

Vývoj technologie Bluetooth v moderních mobilních komunikačních zařízeních

Develop Of Specification Of Bluetooth Technology for Mobile Communication Devices

Zadání bakalářské práce

Student:

Tomáš Jerga

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Vývoj technologie Bluetooth v moderních mobilních komunikačních
zařízeních
Develop Of Specification Of Bluetooth Technology for Mobile
Communication Devices

Zásady pro vypracování:

Technologie Bluetooth se stala součástí moderních komunikačních zařízení. Cílem práce je popsat a porovnat vývojové verze specifikace Bluetooth a zaměřit se na moderní mobilní koncové zařízení, které využívají technologii Bluetooth. Práce má rešeršní charakter ve formě analýzy nasazování technologie Bluetooth do moderních mobilních komunikačních zařízení.

1. Stručný popis technologie Bluetooth.
2. Vývojové verze technologie Bluetooth a jejich parametry.
3. Přehled moderních mobilních komunikačních zařízení s technologií Bluetooth.
4. Rešeršní analýza nasazování technologie Bluetooth.

Seznam doporučené odborné literatury:


MORROW, Robert. *Bluetooth Operation And Use*. United States: The McGraw-Hill 2002. ISBN 0-07-138779-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Přemysl Mer, Ph.D.**


Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry






prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. května 2015

..........

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi s prací pomohli, především mému vedoucímu Ing. Přemyslu Merovi, PhD. za jeho věcné připomínky a rady.

Abstrakt

Tato práce si klade za cíl popsat vývoj technologie Bluetooth v moderních komunikačních zařízeních. První část práce obsahuje stručný popis technologie Bluetooth, historii tohoto standardu, její parametry a základní vlastnosti. Ve druhé části práce popisuje a porovnává jednotlivé vývojové verze technologie Bluetooth. Dále práce poskytuje přehled moderních komunikačních zařízení, především mobilních telefonů. Posledním bodem v této práci je analýza nasazování technologie Bluetooth do různých technologických oblastí.

Klíčová slova: Bluetooth, Bluetooth specifikace, bezdrátová komunikace, komunikační zařízení

Abstract

This thesis aims to describe the development of Bluetooth technology in modern communication devices. The first part contains a brief description of Bluetooth technology, the history of this standard, its parameters and basic properties. Second part describes and compares the development versions of Bluetooth. The work also provides an overview of modern communication devices, especially mobile phones. The last point in this work is the deployment analysis of Bluetooth technology in different technological areas.

Keywords: Bluetooth, Bluetooth specifications, wireless communication, communication devices

Seznam použitých zkratek a symbolů

$\pi/4$ -DQPSK	– $\pi/4$ rotated Differential Quaternary Phase Shift Keying - Diferenciální kvadrurní klíčování fázovým posuvem pootočeným o $\pi/4$
6loWPAN	– IPv6 over low power WPAN - IPv6 přes nízkovýkonovou WPAN
8DPSK	– 8 phase Differential Quaternary Phase Shift Keying - Osmistavové diferenciální klíčování fázovým posuvem
A2DP	– Advanced Audio Distribution Profile - Profil pro vylepšený přenos zvuku
ACL	– Asynchronous Connection-Less - Asynchronní spojově orientovaný logický přenos
ACL-C	– ACL Control - Logický spoj pro řízení asynchronního přenosu
ACL-U	– User Asynchronous/Isochronous - Uživatelský asynchronní/i-zochronní logický spoj
ADVB	– ADvertising Broadcast - Broadcastový logický přenos pro propagaci
ADVB-C	– ADVB Control - Logický spoj pro řízení spoje ADVB
ADVB-U	– ADVB User data - Uživatelský asynchronní logický spoj pro ADVB
AES	– Advanced Encryption Standard - Standard pokročilého šifrování
AHF	– Adaptive Hopping Frequency - Adaptivní přeskokování frekvencí
AM_ADDR	– Active Member ADDRESS - Adresa aktivního členu
AMP	– Alternative MAC/PHY - Alternativní MAC/PHY
AMP-C	– AMP Control - Logický spoj pro řízení AMP spoje
AMP-U	– AMP User Asynchronous/Isochronous - Uživatelský asynchronní/i-zochronní logický spoj pro AMP
ARQ	– Automatic Repeat reQuest - Zpětná vazba s automatickým opakováním
ARQN	– Automatic Request Repeat Number - Indikace potvrzení přijatého paketu
AR_ADDR	– Access Request ADDRESS - Adresa žádosti přístupu
ASB	– Active Slave Broadcast - Broadcastový logický přenos pro aktivní zařízení slave
ATT	– ATtribute protocol - Atributový protokol
AVRCP	– Audio/Video Remote Control Profile - Profil pro dálkové ovládání zvuku nebo videa
BD_ADDR	– Bluetooth Device ADDRESS - Adresa Bluetooth zařízení

BER	– <i>Bit Error Rate</i> - Bitová chybovost
BL	– <i>Baseband Layer</i> - Základní vrstva
BR/EDR	– <i>Basic Rate/Enhanced Data Rate</i> - Základní řídicí část
CAC	– <i>Channel Access Code</i> - Přístupový kód kanálu
CCM	– <i>Counter with cipher block Chaining-Message authentication code</i>
CID	– <i>Channel Identifier</i> - Kanálový identifikátor
CRC	– <i>Cyclic Redundancy Check</i> - Cyklický redundantní součet
CSA	– <i>Core Specification Addenda</i> - Dodatky pro Bluetooth specifikace
CSB	– <i>Connectionless Slave Broadcast</i> - Broadcastový logický přenos pro bezspojové spojení mezi zařízeními <i>slave</i>
CTP	– <i>Cordless Telephony Profile</i> - Profil pro bezdrátové telefony
DAC	– <i>Device Access Code</i> - Přístupový kód zařízení
DH	– <i>Data-High rate</i> - DH pakety
DIAC	– <i>Dedicated IAC</i> - Jednoúčelový IAC
DM	– <i>Data-Medium rate</i> - DM pakety
DUN	– <i>Dial-up Networking Profile</i> - Profil pro připojení k internetu
DV	– <i>Data-Voice</i> - DV pakety
EDR	– <i>Enhanced Data Rate</i> - Rozšířený datový přenos
EIR	– <i>Extended Inquiry Response</i> - Rozšířená odpověď na vyhledávací dotaz
ETSI	– <i>European Telecommunications Standards Institute</i> - Evropský ústav pro telekomunikační normy
eSCO	– <i>extended Synchronous Connection-Oriented</i> - Rozšířený synchronní spojově orientovaný logický přenos
eSCO-S	– <i>User Extended Synchronous</i> - Uživatelský rozšířený synchronní logický spoj
EV	– <i>Enhanced-Voice</i> - EV paket
FAX	– <i>Fax Profile</i> - Fax profil
FDMA	– <i>Frequency Division Multiplex Access</i> - Vícenásobný přístup s kmitočtovým dělením
FEC	– <i>Forward Error Correction</i> - Dopředná korekce chyb
FHS	– <i>Frequency Hop Synchronization</i> - FHS paket
FHSS	– <i>Frequency Hop Spread Spectrum</i> - Metoda rozprostřeného spektra s přeskokováním kmitočtů
FSK	– <i>Frequency Shift Keying</i> - Klíčování frekvenčním posuvem
FTP	– <i>File Transfer Profile</i> - Profil pro přenos souborů
GAP	– <i>Generic Access Profile</i> - Hlavní přístupový profil
GATT	– <i>Generic ATtribute profile</i> - Hlavní atributový profil
GFSK	– <i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> - Gaussovo klíčování frekvenčním posuvem

GIAC	– <i>General IAC</i> - Všeobecný IAC
GOEP	– <i>Generic Object Exchange Profile</i> - Profil pro výměnu dat přes protokol OBEX
GPS	– <i>Global Positioning System</i> - Globální polohovací systém
HCI	– <i>Host Controller Interface</i> - Hostitelské řídicí rozhraní
HEC	– <i>Head Error Check</i> - Kontrolní součet záhlaví
HFP	– <i>Hands-free Profile</i> - Profil pro hands-free
HID	– <i>Human Interface Device Profile</i> - Profil pro připojení vstupních periférií
HOGP	– <i>HID Over GATT Profile</i> - HID přes GATT profil
HS	– <i>High Speed</i> - Vysoká rychlost
HSP	– <i>Headset Profile</i> - Profil pro headsety
HV	– <i>High-quality Voice</i> - HV paket
IAC	– <i>Inquiry Access Code</i> - Přístupový kód vyhledávání
ICP	– <i>Intercom Profile</i> - Profil intercom
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> - Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
IPSP	– <i>Internet Protocol Support Profile</i> - Profil pro IPv6 připojení
ISM	– <i>Industrial, Scientific and Medical</i> - Průmyslové, vědecké, zdravotnické pásmo
L2CAP	– <i>Logical Link Control and Adaptation Protocol layer</i> - Vrstva pro řízení a adaptaci spojení
LAN	– <i>Local Area Network</i> - Lokální síť
LAP	– <i>Lower Address Part</i> - Dolní adresní část
LAP	– <i>LAN Access Profile</i> - Profil pro vytváření LAN
LC	– <i>Link Control</i> - Logický spoj pro řízení spoje
LE	– <i>Low Energy</i> - Nízká energie
LE ACL	– <i>LE Asynchronous Connection</i> - Asynchronní logický přenos LE
LE-C	– <i>LE Control</i> - Logický spoj pro řízení spoje LE
LE-U	– <i>User Asynchronous LE</i> - Uživatelský asynchronní logický spoj pro LE
L_CH	– <i>Logical Channel</i> - Logický kanál
LLCP	– <i>Link Layer Control Protocol</i> - Protokol pro kontrolu základní vrstvy
LLID	– <i>Link Layer ID</i> - ID základní vrstvy
LML	– <i>Link Manager Layer</i> - Vrstva správy spojení
LMP	– <i>Link Manager Protocol</i> - Protokol správy spojení
LT_ADDR	– <i>Logical Transport ADDRESS</i> - Adresa logického přenosu
LTE	– <i>Long Term Evolution</i>
MAC	– <i>Media Access Control</i> - Základní vrstva AMP

MAP	– <i>Message Access Profile</i> - Profil pro zasílání zpráv
MD	– <i>More Data</i> - MD paket
NAP	– <i>Non-significant Address Part</i> - Nevýznamová část adresy
NESN	– <i>nextExpectedSeqNum</i> - Potvrzení poslední přijaté datové jednotky
NFC	– <i>Near Field Communication</i> - Komunikace blízkých polí
OBEX	– <i>OBject EXchange</i> - Protokol pro výměnu objektů
OPP	– <i>Objective Push Profile</i> - Profil pro výměnu objektů
PAL	– <i>Protocol Adaptation Layer</i> - Vrstva pro adaptaci protokolů
PAN	– <i>Personal Area Network</i> - Osobní síť
PBD	– <i>Profile Broadcast Data</i> - Broadcastový logický spoj pro přenos CSB
PDU	– <i>Protocol Data Unit</i> - Datová jednotka
PHY	– <i>PHYsical</i> - Fyzická vrstva AMP
PIM	– <i>Personal Identification Management</i> - Správce osobních informací
PIN	– <i>Personal Identification Number</i> - Osobní identifikační kód
PM_ADDR	– <i>Parked Member ADDRESS</i> - Adresa zaparkovaného členu
PSB	– <i>Parked Slave Broadcast</i> - Broadcastový logický přenos pro zaparkované zařízení
PSK	– <i>Phase Shift Keying</i> - Klíčování fázovým posuvem
RFCOMM	– <i>Radio Frequency Communications port</i> - Protokol pro emulaci sériového portu RS-232
RFU	– <i>Reserved for Future Use</i> - Rezervováno pro budoucí použití
RL	– <i>Radio Layer</i> - Rádiová vrstva
RSSI	– <i>Receiver Signal Strenght Indicator</i> - Indikátor síly přijímaného signálu
SAP	– <i>SIM Access Profile</i> - Profil pro přístupu ke kartě SIM
SCO	– <i>Synchronous Connection-Oriented</i> - Synchronní spojově orientovaný logický přenos
SCO-S	– <i>User Synchronous</i> - Uživatelský synchronní logický spoj
SDP	– <i>Service Discovery Protocol</i> - Protokol pro zjišťování služeb
SDAP	– <i>Service DIscovery Application Profile</i> - Profil pro zjišťování služeb
SEQN	– <i>Sequence Number</i> - Sekvenční číselné schéma
SIG	– <i>Special Interest Group</i> - Speciální zájmová skupina
SIM	– <i>Subscriber Identity Module</i> - Účastnická identifikační karta
SMP	– <i>Security Manager Protocol</i> - Protokol správy bezpečnosti
SN	– <i>transitSeqNum</i> - Identifikace paketu
SPP	– <i>Serial Port Profile</i> - Profil pro emulaci sériového portu
SSP	– <i>Simple Security Pairing</i> - Jednoduché bezpečné párování
SYNCH	– <i>Synchronization Profile</i> - Synchronizační profil
TCS	– <i>Telephony Control protocol Specification</i> - Protokol pro řízení telefonie

TDD	– <i>Time Division Duplex</i> - Duplex s časovým dělením
TDMA	– <i>Time Division Multiplex Access</i> - Vícenásobný přístup s časovým dělením
UAP	– <i>Upper Address Part</i> - Horní adresní část
UART	– <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> - Univerzální asynchronní adaptér vysílač/přijímač
UCD	– <i>Unicast Connectionless Data</i> - Jednosměrný bezspořádávaný přenos dat
USB	– <i>Universal Serial Bus</i> - Univerzální sériová sběrnice
WPAN	– <i>Wireless Personal Area Network</i> - Bezdrátová osobní síť

Obsah

Úvod	4
1 Technologie Bluetooth	5
1.1 Vývoj technologie Bluetooth	5
1.2 Popis Bluetooth podle standardu IEEE 802.15.1	6
2 Vývojové verze Bluetooth	24
2.1 První generace Bluetooth	24
2.2 Druhá generace Bluetooth	25
2.3 Třetí generace Bluetooth	27
2.4 Čtvrtá generace Bluetooth	29
2.5 Používané čipy	38
2.6 Srovnání Bluetooth specifikací	38
3 Přehled komunikačních zařízení s technologií Bluetooth	40
3.1 První mobilní zařízení	40
3.2 Rozmach technologie Bluetooth v mobilních zařízeních	40
3.3 Nástup dotykových mobilních zařízení	41
3.4 Zařízení s podporou Bluetooth Low Energy	42
4 Oblasti použití technologie Bluetooth	43
4.1 Mobilní telefony	43
4.2 Počítače, tablety, domácí elektronika	43
4.3 Automobilový průmysl	44
4.4 Zdravotnictví	45
4.5 Chytrý domov	45
4.6 Další vývoj technologie Bluetooth	46
Závěr	47
Seznam literatury	48

Seznam tabulek

1.1	Výkonové třídy Bluetooth	9
2.1	Příklady čipů Bluetooth [20]	39
2.2	Srovnání specifikací	39
3.1	Vybraná zařízení s první generací Bluetooth	40
3.2	Vybraná mobilní zařízení z let 2005 a 2006	41
3.3	Vybraná dotyková zařízení druhé a třetí generace	41
3.4	Zařízení s profily pro Bluetooth Low Energy	42
4.1	Příklady zařízení používané ve zdravotnictví [28]	45
4.2	Příklady zařízení používané pro ekosystém chytrého domova [28]	45

Seznam obrázků

1.1	Ukázka loga Bluetooth [27]	5
1.2	Architektura technologie Bluetooth	6
1.3	Vrstvový model pro přenos dat	7
1.4	Modulace GFSK [2]	8
1.5	Topologie sítí v technologii Bluetooth	10
1.6	Bluetooth adresa	10
1.7	Vysílání paketů v Bluetooth [8]	11
1.8	Vysílání víceslotových paketů v Bluetooth [8]	11
1.9	Formát paketu Bluetooth	14
1.10	Struktura záhlaví paketu Bluetooth	15
1.11	Režimy zařízení Bluetooth [9]	18
1.12	Formát paketu LMP	19
1.13	Komunikaci mezi Bluetooth jednotkami na protokolu L2CAP [9]	20
2.1	Formát paketu použitý ve druhé generaci Bluetooth	25
2.2	Vrstvy AMP řídicí části ve srovnání s BR/EDR	28
2.3	Architektura Bluetooth LE	32
2.4	Formát paketu Bluetooth LE	32
2.5	Záhlaví propagačního paketu	33
2.6	Záhlaví datového paketu	34
2.7	Příklad spojení zařízení ve specifikaci 4.1	37

Úvod

Cílem mé práce je seznámit čtenáře s jednou z nejrozšířenějších technologií pro bezdrátovou komunikaci na krátkou vzdálenost Bluetooth. Tato technologie se využívá v miliardách zařízeních po celém světě a každým dnem přibývají statisíce dalších. Můžeme tedy říct, že její důležitost a vliv na náš život roste stále více. Bluetooth se používá zejména pro komunikaci a přenosu dat mezi dvěma, či několika zařízeními, mezi nichž lze zařadit například mobilní telefony, tablety, osobní počítače nebo tiskárny. Během posledních let se pak Bluetooth začal ve velkém množství implementovat do domácích spotřebičů, aut nebo například chytrých hodinek a umožňuje tak bezdrátovou komunikaci mezi těmito přístroji a osobními zařízeními. Technologie Bluetooth má také široké využití zejména v lékařských odvětvích a zařízeních. Velkou výhodou této technologie je její nízká energetická náročnost, která umožňuje implementovat Bluetooth do zařízení se zanedbatelným výkonem. Další výhodou je pak nízká cena a hlavně nahrazuje propojení kabely na krátkou vzdálenost uživatelsky přínosnějším bezdrátovým přenosem.

Ve vlastním textu bakalářské práce nejdříve napíšu stručnou charakteristiku technologie Bluetooth, její historii, hlavní parametry a základní vlastnosti. V následující kapitole popíšu jednotlivé vývojové verze standardu Bluetooth, jejich parametry, změny v jejich architektuře, rozsah funkcí apod. Tyto verze porovnáám a srovnám jejich výhody a nevýhody oproti ostatním. Ve třetí kapitole se budu zabývat přehledem moderních komunikačních zařízeních využívající tuto technologii. Zde se budu hlavně soustředit na mobilní telefony. Vždy vyberu nejpoužívanější mobily dané generace a vypíši nejvíce používané funkce každé generace Bluetooth. Součástí kapitoly bude vždy tabulka srovnávající jednotlivé modely různých výrobců a jejich nejpoužívanější Bluetooth profily. Poslední kapitola se bude věnovat popisu různých odvětvích, kde se Bluetooth využívá. Jedná se především o mobilní přístroje, počítače a jejich periférie, automobilový nebo lékařský průmysl. Poslední částí kapitoly je krátké nahlédnutí na možnou budoucnost tohoto standardu.

1 Technologie Bluetooth

Bluetooth je otevřený technologický standard pro bezdrátovou komunikaci na krátké vzdálenosti. Technologie patří mezi bezdrátové osobní sítě s krátkým dosahem WPAN (*Wireless Personal Area Network*) a popisuje ji standard IEEE 802.15.1 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). V dnešní době je tato technologie nasazována do naprosté většiny moderních komunikačních zařízení. Její velkou výhodou je nízká cena, snadná implementace a nízká spotřeba. Na rozdíl od infračerveného přenosu dat není potřeba přímé viditelnosti mezi zařízeními. Další významnou vlastností je schopnost současně zpracovávat data i hlasový přenos. [1, 2]

1.1 Vývoj technologie Bluetooth

V roce 1994 začala švédská firma Ericsson pracovat na vývoji technologie Bluetooth. V roce 1998 byla založena nezisková skupina Bluetooth SIG (*Special Interest Group*), která od té doby publikuje specifikace, stará se o propagaci a ochranu obchodní značky Bluetooth®. Tato skupina byla založena firmami IBM, Toshiba, Nokia, Ericsson a Intel. První verzi specifikace 1.0 představila skupina Bluetooth SIG v červenci roku 1999 a první výrobky s Bluetooth verze 1.0 přišly na trh v roce 2000.

Ke skupině se mezitím přidali firmy 3Com, Lucent Technologies, Microsoft a Motorola. Hlavním sídlem skupiny je Kirkland v americkém státě Washington. Další pobočky se nacházejí v Soulu, Pekingu, Tokiu a Malmö. Dnes má tato skupina více než 24000 členů, a to zejména firmami z oblasti výpočetní techniky a telekomunikací. Svými časnými aktualizacemi standardu Bluetooth udržuje tuto technologii mezi nejpoužívanějšími technologiemi pro přenos dat na krátkou vzdálenost. [3, 4]



Obrázek 1.1: Ukázka loga Bluetooth [27]

1.1.1 Historie názvu

Název této technologie pochází z vikingské historie. Harald Modrozub (anglicky „*Bluetooth*“) byl dánským králem v letech 940-981. Byl znám svými výbornými diplomatickými dovednostmi, díky kterým přesvědčil znepřátelené kmeny, aby spolu začaly komunikovat a ukončily roky neshod. Stejně jako král Harald i technologie Bluetooth se snaží o usnadnění vzájemné komunikace mezi lidmi. [2, 5]

1.2 Popis Bluetooth podle standardu IEEE 802.15.1

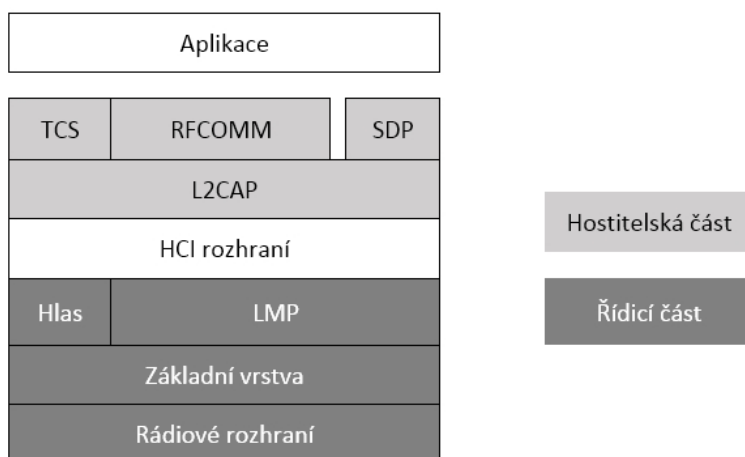
V následujících kapitolách se nachází popis jádra a jednotlivých vrstev technologie Bluetooth. Tento popis vychází ze specifikace IEEE 802.15.1-2005, čili Bluetooth specifikace 1.2.

1.2.1 Jádro technologie Bluetooth

Jádro technologie Bluetooth tvoří čtyři nejnižší vrstvy a protokoly definované každou specifikací. Dále obsahuje protokol pro zjišťování služeb SDP (*Service Discovery Protocol*) a přístupový profil GAP (*Generic Access Profile*). Kompletní Bluetooth aplikace pak obsahuje další služby a protokoly vyšších vrstev definované v dané specifikaci.

Nejnižší tři vrstvy se nazývají *Bluetooth Controller*, neboli řídicí část. Řídicí část se skládá z:

- rádiového rozhraní RL (*Radio Layer*) – je zde definované frekvenční pásmo a je zodpovědný za vysílání a přijímání paketů,
- základní vrstvy BL (*Baseband Layer*) – zde se sestavují pakety a předávají se rádiovému rozhraní,
- vrstvy správy spojení LML (*Link Manager Layer*) – součástí vrstvy je protokol správy spojení LMP (*Link Manager Protocol*), jehož účelem je sestavení, udržování a zrušení spojení.



Obrázek 1.2: Architektura technologie Bluetooth

Řídicí část je pak spojena přes hostitelské řídicí rozhraní HCI (*Host Controller Interface*) k vyšší vrstvě řízení a adaptaci spojení L2CAP (*Logical Link Control and Adaptation Protocol layer*), která se používá k propojení základní vrstvy v řídicí části s protokoly na

vyšších vrstvách, jako je například SDP. Protokoly a ovladače na vyšších vrstvách včetně L2CAP se pak souhrnně označují jako hostitelská část *Bluetooth Host*. Popis architektury Bluetooth se nachází na obrázku 1.2. [2, 4]

1.2.2 Vrstvový model přenosu dat

Vrstvový model pro přenos dat se rozděluje na pět částí: fyzický kanál, fyzický spoj, logický přenos, logický spoj a L2CAP kanál. Toto rozdělení umožňuje efektivněji popsat přenos dat na základní vrstvě. Souhrnně se toto nazývá jako vrstevný model přenosu dat, který zahrnuje fyzickou, logickou a L2CAP vrstvu, viz obrázek 1.3. Vrstvový model tak kopíruje architekturu Bluetooth z hlediska přenosu dat. Podrobnější popis jednotlivých částí následuje v dalších kapitolách.



Obrázek 1.3: Vrstvový model pro přenos dat

1.2.3 Rádiové rozhraní

Bluetooth na fyzické vrstvě pracuje v bezlicenčním ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) frekvenčním pásmu 2,4 GHz. Celý rozsah frekvenčního pásma se nachází na frekvencích 2,400 až 2,4835 GHz. Takovýto rozsah se nepoužívá ve všech zemích, například ve Francii je to 2,4465 až 2,4835 GHz. Toto pásmo je rozděleno na 79 subkanálů se šířkou pásma 1 MHz. V tomto frekvenčním pásmu se zároveň nachází dvě ochranná pásma:

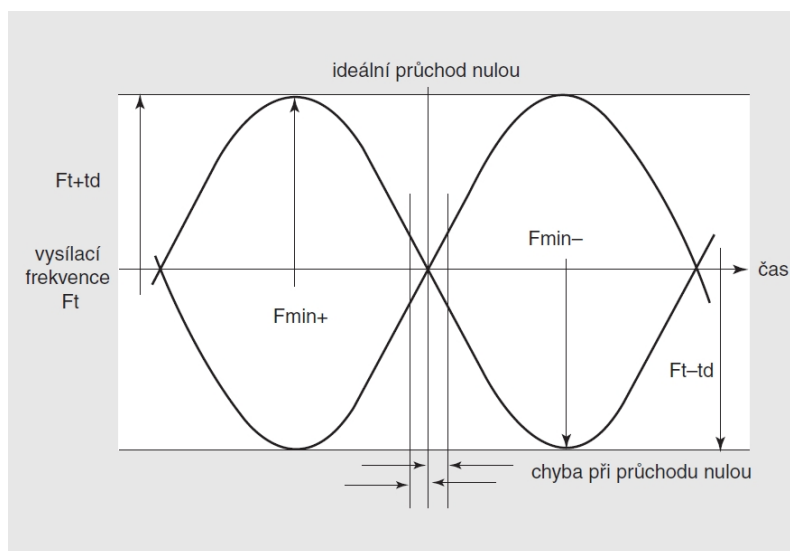
- dolní ochranné pásmo, jehož šířka je 2 MHz,
- horní ochranné pásmo, jehož šířka je 3,5 MHz.

Bluetooth pro přenos dat používá vždy stejné frekvenční pásmo. Data se přenášejí pomocí paketů, které jsou umístěny v tzv. časových slotech. Jeden časový slot trvá 625 μ s. Pro plně duplexní přenos dat se používá časový duplex TDD (*Time Division Duplex*). [1]

1.2.3.1 Použité modulace

Na frekvenci 2,4 GHz pracují kromě Bluetooth také wi-fi nebo mikrovlnné trouby. Aby se předešlo nežádoucímu rušení při komunikaci mezi zařízeními, využívá Bluetooth metodu rozprostřeného spektra s přeskakováním kmitočtů FHSS (*Frequency Hop Spread Spectrum*). Použitím tohoto systému je tak zajištěna lepší kvalita spojení mezi jednotlivými zařízeními. Signál mezi jednotlivými frekvencemi přeskakuje 1600 za sekundu, a to mezi všemi 79 subkanály.

Vedle metody rozprostřeného spektra s kmitočtovými přeskoky FHSS používá technologie Bluetooth pro přenos dat Gaussovu modulaci GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*). Je to typ FSK (*Frequency Shift Keying*) modulace, kde je modulovaný signál tvarován do podoby Gaussovy křivky. Modulace GFSK je dvoustavová a její modulační rychlost je rovna 1 MBd. Binární jedničku představuje kladná odchylka a binární nula je reprezentována zápornou odchylkou, viz obrázek 1.4. Frekvenční modulace se u Bluetooth používají především kvůli své vysoké bezpečnosti a odolnosti proti rušení. [1, 2, 6]



Obrázek 1.4: Modulace GFSK [2]

1.2.3.2 Výkonové třídy

Standard Bluetooth definuje tři výkonové třídy, které se rozdělují podle vstupního výkonu vysílací antény. Nejčastěji se používá třída 2 do 10 metrů. Rozdělení tříd můžete vidět v tabulce 1.1. [1]

1.2.3.3 Úrovně citlivosti

Minimální citlivost Bluetooth přijímače je nastavena na -70 dBm. Při této citlivosti se nesmí překročit hodnota chybovosti BER (*Bit Error Rate*) 0,1%. Maximální hodnotou cit-

Výkonová třída	Maximální vstupní výkon	Nominální vstupní výkon	Minimální vstupní výkon	Dosah
1	100 mW (20 dBm)	N/A	1 mW (0 dBm)	do 100 m
2	2,5 mW (4 dBm)	1 mW (0 dBm)	0,25 mW (-6 dBm)	do 10 m
3	1 mW (0 dBm)	N/A	N/A	do 1 m

Tabulka 1.1: Výkonové třídy Bluetooth

livost je pak -20 dBm. I zde musí být hodnota BER 0,1% nebo nižší. Ve specifikaci 1.1 zde přibyla indikace síly přijímaného signálu RSSI (*Receiver Signal Strength Indicator*). Tento prvek obsluhuje protokol správy spoje LMP a zajistí, že vysílací strana může v případě potřeby měnit výkonovou úroveň u přijímacího zařízení. [1]

1.2.4 Základní vrstva

Hlavní činností této vrstvy je sestavení paketů a následné přeposlání rádiovému rozhraní. Základní vrstva definuje topologii sítě, fyzické kanály, fyzické spoje, logické kanály, logické spoje, typy paketů nebo provozní stavy jednotlivých Bluetooth zařízení.

1.2.4.1 Topologie sítí

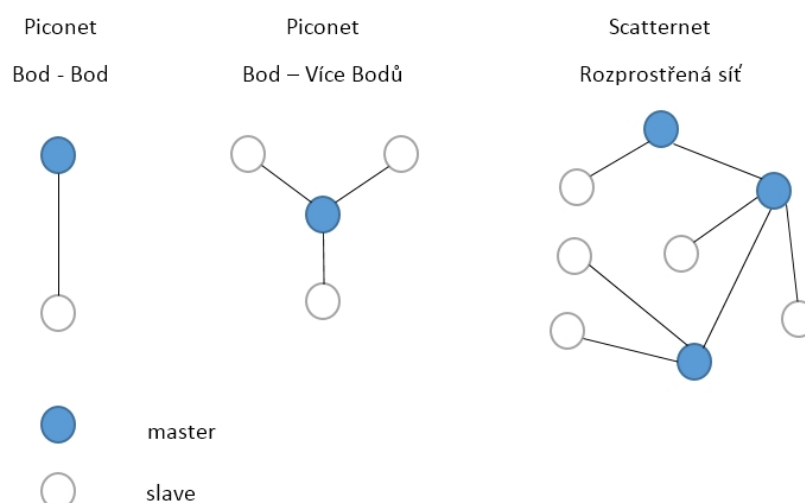
Technologie Bluetooth je založena na nahodilém seskupení zařízení, tzv. *ad-hoc*. Jednotlivá zařízení mezi sebou mohou tvořit topologii bod – bod nebo bod – více bodů, viz obrázek 1.5. Takovéto sítě, které sdílejí svůj fyzický kanál, se nazývají pikosítěmi (*piconet*). Pokud se síť vytvoří z několika pikosítí, mluvíme o rozprostřené síti (*scatternet*). Zařízení se mohou od sítě kdykoliv připojit nebo odpojit. [6]

V pikosíti je jedno zařízení vždy určeno jako tzv. *master*, tedy je nadřazeno všem ostatním. Podřízené zařízení se nazývají *slave*. Každé zařízení v pikosíti má 3 bitovou adresu logického přenosu LT_ADDR (*Logical Transport Address*), která limituje počet zařízení v jedné pikosíti na 8. V pikosíti tak může být nanejvýš 7 *slave*. Zařízení *slave* vždy komunikuje pouze s *master*. Pokud chce *slave* komunikovat s jinými podřízenými zařízeními, probíhá komunikace opět přes zařízení *master*. Řídící zařízení *master* také synchronizuje, přiděluje sekvenci přeskoků mezi kmitočty a díky systému mnohonásobného přístupu s časovým dělením TDMA (*Time Division Multiplex Access*) alokuje časové sloty jednotlivým zařízením *slave*. [4, 6]

Síť *scatternet* se skládá z několika pikosítí. Jednotlivé zařízení tak mohou patřit například do dvou, či několika pikosítí, v jedné se může zařízení jevit jako *slave* a ve druhé jako *master*. Jedno zařízení však může být označeno jako *master* pouze pro jednu pikosíť.

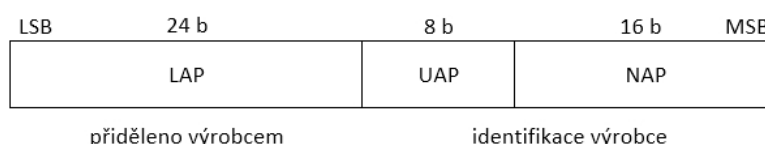
1.2.4.2 Bluetooth adresování

Každý přijímač Bluetooth má svou unikátní Bluetooth adresu BD_ADDR (*Bluetooth Device Address*) o velikosti 48 bitů, viz obrázek 1.6. Ta se dále skládá ze tří částí:



Obrázek 1.5: Topologie sítí v technologii Bluetooth

- pole LAP (*Lower Address Part*) – dolní adresní část o velikosti 24 bitů, z něhož se vytvoří přístupový kód nebo sekvence přeskoků,
- pole UAP (*Upper Address Part*) – horní adresní část o velikosti 8 bitů, který se používá pro šifrování, kontrolu dat a vytváří, stejně jako LAP, sekvenci přeskoků,
- pole NAP (*Non-significant Address Part*) – nevýznamová část o velikosti 16 bitů, který slouží k odlišení Bluetooth zařízení od jednotlivých výrobců.



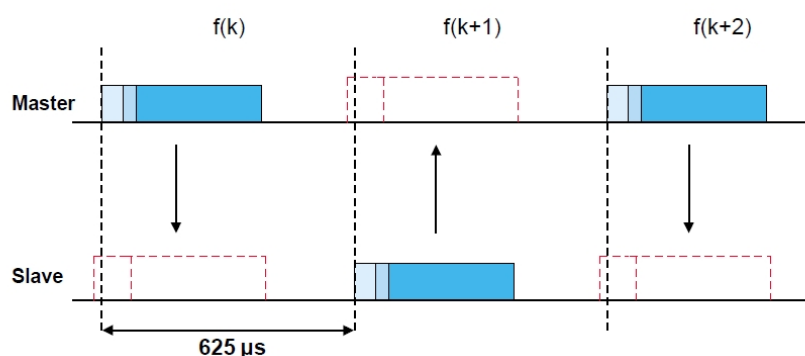
Obrázek 1.6: Bluetooth adresa

Dále má každé zařízení adresu aktivního členu AM_ADDR (*Active Member ADDRESS*), která byla v pozdější specifikaci nahrazena adresou logického přenosu LT_ADDR, a adresu zaparkovaného členu PM_ADDR (*Parked Member ADDRESS*), které mají velikost 3 a 8 bitů a používají se pro adresaci zařízení, které je v pikosíti aktivní nebo v zaparkovaném stavu. [1, 4]

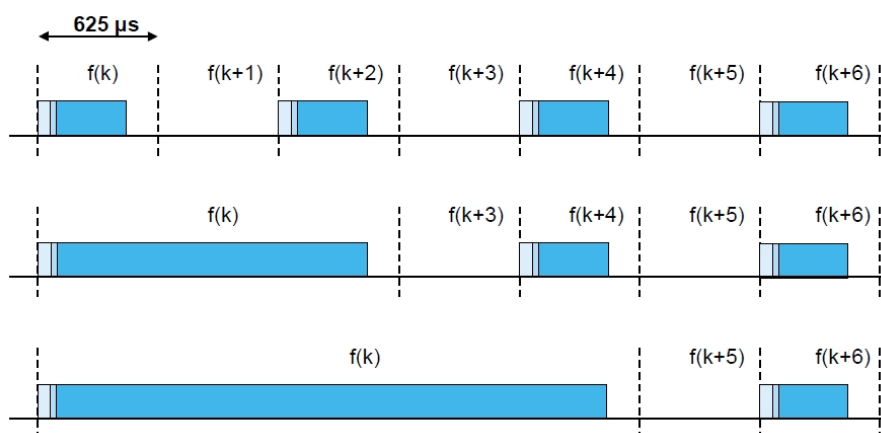
1.2.4.3 Fyzický kanál

Kanál je reprezentován pseudonáhodnou posloupností frekvenčních skoků přes 79 rádiových subkanálů. Pro každou pikosíť je tato sekvence unikátní. Je určena adresou BD_ADDR nadřazeného zařízení *master* a jejími vnitřními hodinami *Bluetooth Clock*. Rychlost přeskoků mezi kanály je 1600 za sekundu.

Každý kanál je rozčleněn do časových úseků (slotů), kde každý úsek odpovídá jednomu kanálovému přeskoku. Délka tohoto slotu je $625\ \mu\text{s}$. Sloty se číslují podle vnitřních hodin nadřazeného zařízení ($0 - 2^{27}-1$). V těchto slotech lze mezi zařízeními *master* a *slave* přenášet data. Obousměrná komunikace se vytvoří díky časovému dělicímu duplexu TDD. *Master* zařízení vysílá vždy v sudých úsecích, *slave* v lichých. Maximální doba trvání jednoho paketu je $366\ \mu\text{s}$, zbylých $259\ \mu\text{s}$ je vyhrazeno pro změnu frekvence. Paket lze poslat i přes několik časových úseků, a to jako jednoslotový, tříslotový nebo pětislotový paket. Princip vysílání paketů lze vidět na obrázku 1.7 a obrázku 1.8. [1, 7]



Obrázek 1.7: Vysílání paketů v Bluetooth [8]



Obrázek 1.8: Vysílání víceslotových paketů v Bluetooth [8]

Ve standardu Bluetooth existují čtyři fyzické kanály:

- Základní fyzický kanál pikosítě (*Basic Piconet Physical Channel*) – pokud se zařízení dostanou do připojeného režimu, automaticky se používá základní kanál pikosítě.
- Adaptivní fyzický kanál pikosítě (*Adapted Piconet Physical Channel*) – používá AHF (*Adaptive Hopping Frequency*) přeskakování, které lépe chrání přenos dat vůči interferencím. Rozdílem mezi AHF a základním systémem přeskakování frekvencí je v tom, že AHF může používat méně než 79 frekvencí. To u základního fyzického kanálu není možné.
- Fyzický kanál pro vyhledávání (*Inquiry Scan Physical Channel*) – na tomto kanálu může zařízení vyhledávat ostatní zařízení Bluetooth. Tento kanál používá přeskačovací frekvence pomalejší než u základního fyzického kanálu.
- Fyzický kanál pro připojení (*Page Scan Physical Channel*) – fyzický kanál používaný pro připojení dvou zařízení Bluetooth k sobě.

1.2.4.4 Fyzický spoj

Fyzický spoj se stará o spojení mezi jednotlivými zařízeními. Mezi jeho vlastnosti patří například řízení výkonu mezi zařízeními, dohled spoje, zajišťuje kódování, změna rychlosti přenosu dat v závislosti na kvalitě spojení atd.

Fyzický spoj je úzce spojený s funkcí fyzického kanálu. Součástí této podvrstvy jsou dvě entity pojmenované jako aktivní fyzický spoj (*Active Physical Link*) a zaparkovaný fyzický spoj (*Parked Physical Link*). [1]

1.2.4.5 Logický přenos

Na podvrstvě logického přenosu může být sestaveno mezi zařízeními *master* a *slave* několik kanálů logického přenosu. Mezi tyto kanály patří: [1]

- Synchronní spojově orientovaný logický přenos SCO (*Synchronous Connection-Oriented*) - symetrické bod-bod spojení mezi zařízeními *master* a *slave*. SCO používá rezervované časové sloty v přesných intervalech, takže jej lze považovat za spojení založené na principu přepojování kanálů. Typicky se používá pro přenos hlasu. *Master* může vytvořit až tři SCO spojení mezi jedním nebo více *slave*. Zařízení *slave* může být spojen třemi SCO spojeními z jednoho *master* nebo dvěma spojeními z různých zařízení *master*. Pakety SCO se nikdy nepřeposílávají.
- Rozšířený synchronní spojově orientovaný logický přenos eSCO (*extended Synchronous Connection-Oriented*) - má podobnou strukturu jako SCO, ale jeho výhodou je možnost přeoslání chybného paketu.
- Asynchronní spojově orientovaný logický přenos ACL (*Asynchronous Connection-Less*) - kanál je založen na principu přepojování paketů. ACL spojení lze vytvořit mezi zařízením *master* a všemi aktivními zařízeními *slave* v pikosíti. Mezi dvěma

zařízeními lze vytvořit pouze jedno ACL spojení. Pro většinu ACL paketů je zajištěno přeposílání z důvodů zajištění integrity dat. Pokud ACL paket není adresován specifickému zařízení *slave*, je považován za *broadcast* paket a je přeposlán všem aktivním *slave* v pikosíti. Pokud v paketu nejsou žádná data, přenos mezi zařízeními vůbec neproběhne.

- Broadcastový logický přenos pro aktivní zařízení *slave* ASB (*Active Slave Broadcast*) - umožňuje přenos dat mezi *master* a všemi aktivními *slave* v dané pikosíti. ASB může být použit mezi zařízeními v tzv. kanálové skupině vrstvy L2CAP.
- Broadcastový logický přenos pro zaparkované zařízení *slave* PSB (*Parked Slave Broadcast*) - umožňuje přenos dat mezi *master* a zaparkovanými *slave* v pikosíti.

1.2.4.6 Logické spoje

Logické spoje se starají o správu a řízení spojení nebo přenos asynchronních, izochronních a synchronních uživatelských dat.

Standard definuje pět logických spojů: [1]

- Logický spoj pro řízení spoje LC (*Link Control*) – je namapován na záhlaví paketu. Je přenášén na všech paketech, kromě ID paketu, který je bez záhlaví. Kanál přenáší informace o řízení toku nebo informaci ARQ (*Automatic Repeat reQuest*).
- Logický spoj pro řízení asynchronního přenosu ACL-C (*ACL Control*) – na tomto logickém spoji se přenáší řídicí informace mezi vrstvami pro správu spoje LML. Může být nesen ACL i SCO přenosem.
- Uživatelský asynchronní/izochronní logický spoj ACL-U (*User Asynchronous/Isochronous*) – přenáší asynchronní a izochronní uživatelská data vrstvy L2CAP.
- Uživatelský synchronní logický spoj SCO-S (*User Synchronous*) – přenáší synchronní uživatelská data.
- Uživatelský rozšířený synchronní logický spoj eSCO-S (*User Extended Synchronous*) – přenáší rozšířená synchronní uživatelská data.

1.2.4.7 Formát paketu

Data jsou přenášeny ve formě paketu. Každý paket se skládá z přístupového kódu o velikosti 72 bitů, záhlaví o velikosti 54 bitů a informačního pole, který má velikost v rozmezí 0 až 2745 bitů, viz obrázek 1.9. Jednotlivé pakety mohou být složeny i ve zkrácené podobě. Mohou se skládat pouze z přístupového kódu nebo z přístupového kódu a záhlaví.



Obrázek 1.9: Formát paketu Bluetooth

1.2.4.8 Přístupový kód

Každý paket začíná přístupovým kódem. Používá se pro synchronizaci, kompenzaci stejnosměrné složky a identifikaci. Je vytvořen z adresy LAP a identifikuje všechny pakety posílané v dané pikosíti. Používá se také ve vyhledávacím a připojovacím režimu. V těchto případech je přístupový kód použit jako signalizační zpráva.

Mohou být tři druhy přístupových kódů:

- přístupový kód kanálu CAC (*Channel Access Code*), který se používá pro identifikování pikosítě,
- přístupový kód zařízení DAC (*Device Access Code*), který se používá pro signalizační procesy,
- přístupový kód dotazování IAC (*Inquiry Access Code*), který se používá při vyhledávání ostatních zařízení.

Přístupový kód IAC se ještě dělí na všeobecný GIAC (*General IAC*), který vyhledává všechny dostupné Bluetooth zařízení, a jednoúčelový DIAC (*Dedicated IAC*), který se používá při vyhledávání zařízení s určitou charakteristikou. [1]

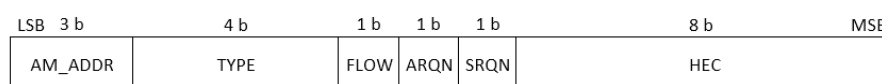
1.2.4.9 Záhlaví

Záhlaví obsahuje informace pro řízení a spojení. Délka záhlaví je 18 bitů, ale díky zabezpečení FEC 1/3 (*Forward Error Correction*) záhlaví třikrát zvětší svou velikost na 54 bitů. Skládá se z 6 polí:

- Adresa aktivního členu AM_ADDR, která jednoznačně reprezentuje zařízení *slave* v dané pikosíti. Všechny pakety poslané mezi *master* a *slave* mají stejnou adresu AM_ADDR. Pokud se zařízení *slave* odpojí a znovu připojí ve stejné pikosíti, bude mít jinou adresu.
- Kód TYPE, jehož velikost je 4 bity a rozlišuje, který typ paketu je pro přenos použit.
- Kód FLOW je jednobitový a jeho úlohou je řízení toku přes spoj ACL.
- Indikace ARQN (*Automatic Request Repeat Number*) slouží jako potvrzení úspěšného doručení paketu, který je zabezpečen cyklickým kódem CRC (*Cyclic Redundancy Check*), vysílači. Využívá se zde rozhodovací zpětná vazba ARQ.

- SEQN (*Sequence Number*) poskytuje sekvenční číselné schéma proudu paketů.
- HEC (*Head Error Check*) je osmibitové kontrolní slovo, které obsahuje každé záhlaví. Toto slovo kontroluje integritu celého záhlaví.

Schéma záhlaví paketu je znázorněno na obrázku 1.10. [1, 7]



Obrázek 1.10: Struktura záhlaví paketu Bluetooth

1.2.4.10 Informační pole

V informačním poli se rozlišují dva formáty: [1, 7]

- Hlasové pole, který se používá pro pakety spojení SCO a má konstantní délku 240 bitů pro pakety HV (*High-quality Voice*) a 80 bitů pro pakety typu DV (*Data-Voice*).
- Datové pole, který se používá pro pakety spojení ACL a skládá se ze tří částí: záhlaví informačního pole, těla informačního pole a CRC součtu, který je volitelný. Záhlaví informačního pole specifikuje logický kanál L_CH (*Logical Channel*), řídí tok logického kanálu pomocí kódu FLOW a obsahuje indikátor délky informačního pole (velký 5 nebo 9 bitů, a to podle délky záhlaví). Tělo informačního pole obsahuje samotná data, informace o uživateli a určuje efektivní uživatelskou propustnost. CRC kód je sestaven velmi podobně jako HEC kód v záhlaví celého paketu.

1.2.4.11 Typy paketů

Pakety v pikosíti jsou svázány s kanálem logického přenosu, přes který jsou posílány. Paketů, které přenášejí užitečné informace je celkem 15.

Pakety se dělí do čtyř segmentů. První segment obsahuje čtyři kontrolní pakety určené pro oba typy spojů. Druhý segment je pro pakety, které používají jeden časový slot. Zde je definováno sedm paketů. Třetí segment je pro pakety, které používají tři časové sloty. Jsou definovány čtyři typy paketů. Poslední segment je pro pakety používající pět časových slotů pro svůj přenos. Obsahuje dvojici těchto paketů.

Mezi kontrolní pakety patří: [1]

- ID paket – tento typ paketu není do přehledu zahrnut. Má fixní délku 68 bitů. Používá se ve vyhledávacím, připojovacím a odpovídacím režimu.
- NULL paket – nemá žádné informační pole. Má délku 126 bitů a je použit při přenosu informace o potvrzení doručení paketu vysílači nebo stavu vyrovnávací paměti.

- POLL paket – je stejný jako NULL paket, ale při přijetí tohoto paketu musí druhé zařízení odpovědět.
- FHS paket (*Frequency Hop Synchronization*) – celková délka paketu je 240 bitů a přenáší se v něm adresa zařízení BD_ADDR a stav vnitřních Bluetooth hodin. Používá se ve vyhledávacím, připojovacím režimu a výměně *master* a *slave* zařízení. Dále je použit například pro synchronizaci frekvenčních skoků.
- DM1 paket (*Data-Medium rate*) – podporuje přenos kontrolních zpráv a může přenášet i uživatelská data.

SCO pakety se vyznačují tím, že nemají zabezpečení CRC kódem a v případě nepřijatého paketu se zpětně neposílají. Mezi tyto pakety patří: [1]

- HV1, HV2, HV3 paket – velikost paketu je 10, 20 a 30 bajtů. Velikost informačního pole je u všech paketů 240 bitů a přenosová rychlost je 64 kbit/s. Jsou to pakety, které přenášejí hlasové informace a liší se ve velikosti a délce záznamu přenášené řeči.
- DV paket – kombinace hlasového a datového paketu. Hlasové a datové informační pole se zpracovávají zvlášť. Hlas se zpracovává synchronně, data mají zabezpečení CRC kódem a v případě potřeby mohou být znovu přenesena.

eSCO pakety obsahují zabezpečení CRC kódem a je možné je opětovně poslat při chybném doručení. Zde patří: [1]

- EV3 paket (*Enhanced-Voice*) – může nabývat velikosti až 30 bajtů a přenáší se v jednom časovém slotu.
- EV4 paket – může nabývat velikosti až 120 bajtů, přenáší se ve třech časových slotech a je zabezpečen dopřednou ochranou 2/3 FEC.
- EV5 paket – může nabývat velikosti až 180 bajtů a přenáší se v pěti časových slotech.

ACL pakety mohou přenášet užitečná data nebo kontrolní data. Pro ACL je definováno 7 paketových typů: [1]

- DM1 paket – nese pouze informace. Informační pole je velké 18 bajtů a obsahuje 16 bitový CRC kód. Přenáší se v jednom časovém slotu. Paket je navíc zabezpečen kódem FEC 2/3, který přidá 5 paritních bitů do každého 10 bitového segmentu.
- DH1, DH3, DH5 paket – podobný jako DM1 paket, ale neprobíhá u něj FEC kódování. Informační pole má u těchto paketů velikost 28, 185 nebo 341 bajtů. Pakety se liší počtem potřebných časových slotů k přenosu.
- DM3, DM5 paket – jedná se o rozšířené pakety DM1. Informační pole je velké 123 nebo 226 bajtů a k přenosu používá tři nebo pět časových slotů.

- AUX1 paket – podobný jako DH1 paket, ale nemá zabezpečení CRC kódem. Informační pole má velikost 30 bajtů a k přenosu používá jeden časový slot.

1.2.4.12 Režimy jednotek Bluetooth

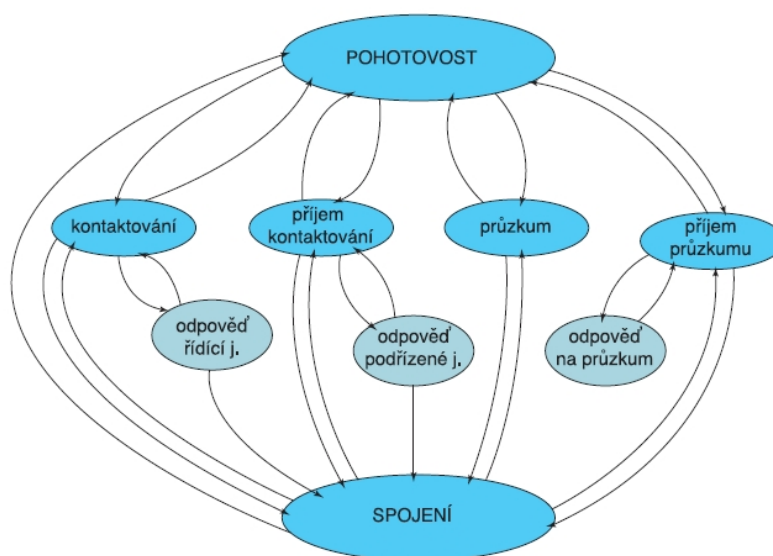
Bluetooth jednotka se může v aktivní pikosíti nacházet v několika různých režimech. Bluetooth zařízení se může nacházet ve třech hlavních režimech: pohotovostním, zaparkovaném a připojeném režimu. V pohotovostním stavu spotřebovává zařízení malé množství energie a může přejít do vyhledávacího a připojovacího stavu, viz obrázek 1.11.

Zařízení v zaparkovaném stavu potřebuje ke svému fungování malé množství energie, *slave* není součástí pikosítě, ale je synchronizován. Zařízení v zaparkovaném režimu zahodí svou adresu LT_ADDR a přidělí se mu dvě nové adresy AR_ADDR (*Access Request ADDRess*) a PM_ADDR. [1, 9]

- Vyhledávací režim (*Inquiry*) – zařízení je v tomto stavu pokud chce nalézt jiné zařízení v dosahu. Bluetooth zařízení sbírá adresy a řídicí hodiny všech zařízení v dosahu, které odpoví na vyhledávací dotaz. Poté mohou s těmito zařízeními navázat kontakt. Vyhledávací dotazy se posílají vždy na jiných přeskokových frekvencích a využívají se k tomu ID pakety. V jednom časovém slotu mohou být vysílány dva ID pakety. Paket obsahuje přístupový kód IAC.
- Příjem vyhledávacího režimu (*Inquiry scan*) – zařízení v tomto režimu naslouchá na jedné přeskokové frekvenci a pokud přijme vyhledávací dotaz s odpovídajícím přístupovým kódem IAC a vyšle druhému zařízení paket FHS, který nese informace o daném zařízení.
- Připojovací režim (*Page*) – tento režim používá zařízení *master* pro aktivaci a udržení spojení se zařízením *slave*. *Master* se snaží zachytit ID paket, který nese přístupový kód DIAC zařízení *slave*, na různých přeskokových frekvencích. Pro přesnější a rychlejší proces připojení využije *master* informaci o řídicích hodinách zařízení *slave*. Zmenší se tak interval přeskokových frekvencí, na kterých může zařízení *slave* přijímat.
- Příjem připojovacího režimu (*Page scan*) – je velmi podobný příjmu vyhledávacímu režimu. Na jedné frekvenci naslouchá, a pokud přijme ID paket se svým DIAC kódem, vyšle svůj ID paket zařízení *master*. Zařízení *master* tak již bude znát frekvenci, na které *slave* vysílá a pošle FHS paket s informacemi (např. stav řídicích hodin *master* zařízení), které jsou potřebné k ustanovení spojení.

1.2.4.13 Připojený režim

V připojeném režimu je již sestaveno spojení a zařízení si mohou mezi sebou posílat data. V připojeném režimu může zařízení operovat v několika režimech: [1, 9]



Obrázek 1.11: Režimy zařízení Bluetooth [9]

- Aktivní režim (*Active Mode*) – v tomto režimu se provádí aktivní přenos dat na fyzickém kanálu. Celou komunikaci řídí zařízení *master*. Aktivní režim také podporuje posílání synchronizačních paketů pro udržení komunikace se zařízením *slave*.
- Sniff režim (*Sniff Mode*) – ve Sniff režimu dochází k omezení provozu na fyzickém spoji ACL mezi zařízeními. *Master* vysílá pakety pouze v určitých časových slotech. *Slave* tak omezí spotřebu energie. Tento režim ovlivňuje pouze přenos dat na fyzickém spoji ACL. Přenos dat na SCO není nijak omezen.
- Režim podržení (*Hold Mode*) – v režimu podržení zařízení *slave* nebude podporovat přenos dat na fyzickém spoji ACL. SCO je stále plně podporován. Tento režim je jen dočasný, po uplynutí určitého času se zařízení přepne do předchozího režimu.

1.2.5 Protokol správy spojení LMP

LMP je protokol, který řídí, sestavuje a ukončuje spojení mezi dvěma Bluetooth zařízeními. Kontroluje spojení mezi fyzickými a logickými kanály jednotlivých zařízení. LMP komunikuje mezi dvěma zařízeními pomocí fyzického spoje ACL.

Pro komunikaci mezi LM vrstvami používá LMP zprávy. Šíří se v informačním poli paketů. LM zprávy se vždy v LM vrstvě odfiltrují a nepřenáší se do vyšších vrstev.

Soupis možných zpráv protokolu LMP:

- Kontrola spojení – zde patří například sestavení a ukončení spojení, řízení výkonu, kontrola víceslotových paketů apod.
- Bezpečnost – zde patří autentizace, párování, šifrování, výměna klíčů apod.

- Informační zprávy – zprávy zde posílají informace o verzi LMP protokolu, hodnotu vnitřních hodin apod.
- Správa režimů – zde se spravují režimy zařízení v připojeném stavu.

Zprávy se přenáší v rámci datové jednotky PDU (*Protocol Data Unit*). Zprávy protokolu LMP a L2CAP se rozlišují pomocí jiného logického kanálu L_CH umístěného v záhlaví informačního pole. Pakety PDU jsou přenášeny v jednom časovém slotu a skládají se z pole prováděcího ID (*Transaction ID*) a operačního znaku (*OpCode*), které má velikost jeden bajt, a vlastního informačního pole, zde jako obsah. Prováděcí ID je bitový znak, který určuje, zda je zařízení *master* nebo *slave*. Operační znak určuje druh zprávy, obsah její parametry. Velikost obsahu závisí na počtu parametrů. [1, 9]

Znázornění paketu LMP na obrázku 1.12.



Obrázek 1.12: Formát paketu LMP

1.2.6 Rozhraní HCI

Hostitelské kontrolní rozhraní HCI poskytuje rozhraní pro příkazy mezi základní vrstvou a vrstvou pro řízení spoje. Další funkcí tohoto rozhraní je přístup k hardwarovým částem Bluetooth zařízení a jeho registrům. Zjednodušeně to lze popsat jako možnost komunikace uživatele s řídicí částí Bluetooth.

HCI je tedy ekvivalentem transportní vrstvy referenčního modelu ISO/OSI. Přenos zpráv a signálů se přenáší mezi fyzickými sběrnici, které se ovládají pomocí HCI ovladače v hostitelské části a HCI firmware v řídicí části. V této specifikaci jsou definované tři transportní vrstvy HCI: [1, 5]

- transportní vrstva USB HCI (*Universal Serial Bus*),
- transportní vrstva RS 232 HCI,
- transportní vrstva UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) HCI.

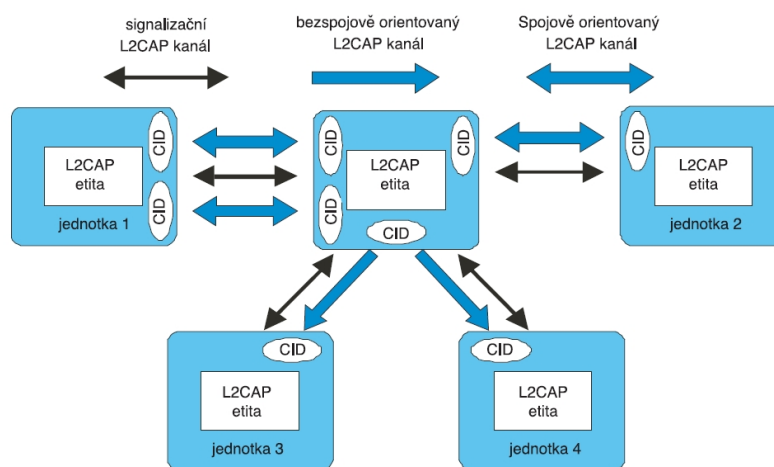
1.2.7 Protokol pro řízení a adaptaci spojení L2CAP

Protokol pro řízení a adaptaci spojení poskytuje spojové a bezspojové datové služby pro protokoly vyšší vrstvy. Propojuje základní vrstvu v řídicí části s vyššími vrstvami v hostitelské části systému Bluetooth. L2CAP provádí multiplexaci datových toků, segmentaci a operaci pro zpětné sestavení paketů. Dalším prvkem L2CAP je monitorování kvality

spojení QoS (*Quality of Service*). Zajišťuje tak dodržení dohodnutých parametrů. L2CAP dovoluje posílat a přijímat pakety vyšších vrstev do velikosti 64 kB.

L2CAP podporuje pouze multiplexování dat posílaných přes fyzický spoj ACL. Pro identifikaci každého kanálu se používá kanálový identifikátor CID (*Channel Identifier*). Kanálový identifikátor je relativní ke každému zařízení a přiřazuje se nezávisle na jiném zařízení.

Při spojitě orientovaném přenosu se data přenáší mezi dvěma zařízeními zároveň. Při bezspojitě orientovaném přenosu se přenáší data pouze jedním směrem. Tohoto se využívá především pro kanálové skupiny, což je situace, kdy zdrojový CID kanál reprezentuje více Bluetooth zařízení, viz obrázek 1.13.



Obrázek 1.13: Komunikaci mezi Bluetooth jednotkami na protokolu L2CAP [9]

L2CAP může fungovat ve třech režimech:

- základní L2CAP režim (*Basic L2CAP Mode*),
- režim řízení toku (*Flow Control Mode*),
- režim opětovného přenosu (*Retransmission Mode*).

Základní režim je použit standardně, pokud není výslovně povoleno použití jednoho ze dvou dalších režimů.

V režimu řízení toku a režimu opětovného přenosu se datové jednotky PDU přenášejí očíslované a jsou při přijetí potvrzovány. Rozdíl mezi těmito dva režimy je v tom, že v režimu řízení toku se chybné pakety zpátky nepřeposílávají, zatímco v režimu opětovného přenosu ano. [1, 4]

1.2.8 Protokoly vyšších vrstev

Ve specifikaci 1.1 se nachází několik protokolů vyšších vrstev, například protokol SDP, GAP, protokol TCS (*Telephony Control protocol Specification*) nebo protokol RFCOMM (*Radio Frequency Communications port*).

Protokol SDP slouží k zjišťování dostupných služeb pro zařízení Bluetooth. Společně s přístupovým profilem GAP je základním prvkem vyšších vrstev hostitelské části Bluetooth. SDP protokol pracuje na mechanismu klient-server. Bluetooth zařízení, který nabízí služby je server, zařízení, které vyhledává služby je klient. Server uchovává seznam dostupných služeb. Každá položka seznamu odpovídá jedné službě (atributu).

TCS je protokol pro řízení telefonie. Tento protokol simuluje terminál s telefonními funkcemi mezi dvěma Bluetooth zařízeními. TCS umožňuje bod - bod signalizaci a v určitých případech i bod - více bodů signalizaci. Bod – bod signalizace se používá, když se ví, která strana zahájila hovor. Bod – více bodů se používá v případě, kdy je nutno zavolat na více zařízení v dosahu. Tento způsob přenáší L2CAP pomocí bezspojově orientovaných kanálů.

RFCOMM protokol emuluje sériové rozhraní RS-232 nad protokolem L2CAP. Protokol podporuje až 60 spojení mezi dvěma zařízeními. [1, 4]

1.2.9 Bezpečnost technologie Bluetooth

Standard Bluetooth využívá pro zabezpečení hned několik různých mechanismů. Samotný stupeň zabezpečení si každý výrobce volí sám a dělí se do 4 zabezpečovacích režimů:

- zabezpečovací režim 1 - zařízení pracuje bez jakékoliv ochrany,
- zabezpečovací režim 2 - zabezpečení na úrovni služeb,
- zabezpečovací režim 3 - zabezpečení na úrovni spojové vrstvy,
- zabezpečovací režim 4 - zabezpečení na úrovni spojové vrstvy s výměnou šifrovacích klíčů.

Zabezpečení komunikace mezi zařízeními se provádí na spojové vrstvě. Využívají se zde 4 entity:

- adresa Bluetooth zařízení BD_ADDR - tato adresa má velikost 48 bitů, každé zařízení má svou jedinečnou adresu a je neměnná,
- autentizační klíč - odvozuje se během navázání spojení mezi dvěma zařízeními a jeho velikost je 128 bitů,
- šifrovací klíč – je odvozen od autentizačního klíče během autentizace. Délka tohoto klíče se pohybuje od 8 do 128 bitů. Tento klíč se musí změnit každých 23,3 hodin, jinak se spojení zruší. Autentizační i šifrovací klíče se generují podle PIN kódu daného zařízení,
- náhodné číslo – toto číslo je různé pro každé zařízení a generuje se vždy při inicializaci nové operace.

Díky této autentizaci se předchází nežádoucímu úniku dat. Při spojení dvou mobilních telefonů může být jako autentizační kód požadován například PIN (*Personal Identification Number*) jednoho z telefonů.

Co se týče bezpečnosti, je nutné poznamenat, že je tento standard náchylný například na DoS útoky nebo odposlechy. [2, 5]

1.2.10 Bluetooth profily

Bluetooth profily obsahují operace, které dvě zařízení použijí při využití dané služby. Definují tak způsob komunikace mezi zařízeními. Profily se z hlediska architektury nacházejí nad všemi ostatními protokoly. Ve specifikaci 1.1 se nachází těchto profilů 13, v současnosti jich je kolem padesáti. Základním profilem, který používají všechna zařízení je GAP profil.

GAP profil zajišťuje služby společné pro všechny Bluetooth zařízení a definuje, jakým způsobem se mohou dvě zařízení k sobě připojit. Profil zahrnuje služby, které používají transportní, protokolové a aplikační profily, tedy například bezpečnost, autentizace nebo režimy jednotek. Tento profil je také základním článkem pro ostatní profily. Ostatní profily z něj vycházejí a využívají pak jeho určitou část.

Mezi další profily patří například: [10]

- *Cordless Telephony Profile* CTP - určený pro přístup ke službám pevné telefonní sítě,
- *Dial-up Networking Profile* DUN - poskytuje standardní přístup k internetu a jiným vytáčeným službám,
- *Fax Profile* FAX - umožňuje přijímat a odesílat faxy,
- *File Transfer Profile* FTP - umožňuje přenos souborů,
- *Generic Access Profile* GAP - definuje ostatní profily,
- *Generic Object Exchange Profile* GOEP - definuje protokoly a procedury pro přenos dat mezi dvěma Bluetooth zařízeními přes protokol OBEX (*OBject EXchange*),
- *Headset Profile* HSP - poskytuje podporu hlasového přenosu pro sluchátka s mikrofonem,
- *Intercom Profile* ICP - umožňuje přenos hlasu mezi mobilním telefonem a pevnou sítí,
- *LAN Access Profile* LAP - umožňuje přístup k sítím LAN nebo WAN přes jiné zařízení, které má fyzické připojení k síti,
- *Object Push Profile* OPP - je základní profil, který používá profil GOEP pro přenášení drobných "objektů", jakými jsou například obrázky nebo virtuální vizitky,
- *Service Discovery Application Profile* SDAP - zjišťuje, jaké služby jsou k dispozici na zařízení Bluetooth, ke kterému se chceme připojit,

- *Serial Port Profile SPP* - který se používá pro komunikaci se sériovým portem RS 232,
- *Synchronization Profile SYNCH* - pomocí něhož umožňuje výměnu PIM (*Personal Identification Management*) informací (např. telefonní seznamy) mezi mobilními telefony.

Další profily jsou následující: [10]

- *Advanced Audio Distribution Profile A2DP* - přenáší zvuk ve vysoké kvalitě mezi připojenými zařízeními,
- *Audio/Video Remote Control Profile AVRCP* – profil, používaný k dálkovému ovládání televizorů, autonavigací apod.
- *Hands-free Profile HFP* - jehož činností je komunikace mobilního telefonu se sadou hands-free v automobilech,
- *Human Interface Device Profile HID* – slouží k připojení vstupních periférií (myš, klávesnice) k přístroji,
- *HID Over GATT Profile HOGP* – HID profil pro zařízení s řídicí částí LE,
- *SIM Access Profile SAP* - profil, který se používá v automobilech k synchronizaci údajů SIM (*Subscriber Identity Module*) karty s automobilovým hands-free setem.

2 Vývojové verze Bluetooth

Vývoj Bluetooth začal již v roce 1994, kdy zaměstnanci švédské firmy Ericsson, Jaap Haartsen a Sven Mattison, poprvé představili návrh nové technologie pro bezdrátový přenos dat mezi dvěma zařízeními. Specifikace pak byla v roce 1998 formalizovaná skupinou Bluetooth SIG, v lednu 1999 se objevila specifikace 0.8, která se však ještě dočkala několika přepracování. V červenci 1999 pak tato skupina vydala první oficiální specifikaci Bluetooth 1.0.

Všechny specifikace standardu Bluetooth jsou navrženy tak, aby byly zpětně kompatibilní s nižšími verzemi. Pokud se však takto zařízení spárují, musí použít pouze funkce dané nižší specifikací.

2.1 První generace Bluetooth

První oficiální specifikací byla verze 1.0. Tuto specifikaci zanedlouho následovaly další dvě verze Bluetooth 1.0a a Bluetooth 1.0b. Specifikace měly inovovat určité prvky navržené ve verzi 1.0. Specifikace 1.0a se zaměřila na samotnou architekturu Bluetooth, verze 1.0b pak specifikovala 13 Bluetooth profilů. Použitelnost těchto verzí v reálném uživatelském prostředí ale nebyla příliš velká. Výrobci měli velké problémy s kompatibilitou svých zařízení s jinými výrobky ostatních firem.

Problémy se objevovaly již při samotném párování mezi dvěma zařízeními, problémové bylo i vytváření jednoduchých pikosít. Také se naskytly problémy s využitím některých plánovaných služeb, které mělo Bluetooth v budoucnu poskytnout. [5, 11]

Verze 1.1 byla první skutečně použitelnou specifikací Bluetooth technologie, kterou lze nasadit do komerčně vyráběných zařízení. Byla vydána v únoru 2001 a z velké části opravuje chyby předešlých verzí. V roce 2002 byla tato specifikace přijata jako standard IEEE 802.15.1-2002. Tato specifikace podporuje přenos dat v rychlosti do 1 Mbit/s. Reálně však rychlosti dosahovaly mnohem menších hodnot. [12]

Tato verze obsahovala několik nových funkcí. Byl přidán indikátor síly přijímaného signálu RSSI a byla přidána možnost využití nešifrovaného komunikačního kanálu mezi dvěma připojenými zařízeními.

Specifikace 1.2 byla vydána v roce 2003 a jedná se o přepracovanou specifikaci 1.1 umožňující přenos dat na vyšších rychlostech, až 721 kbit/s. Specifikace se dočkala přepracování z hlediska formalizace a logické návaznosti. Kapitoly jsou teď řazeny do logičtějšího sledu. Specifikace 1.2 byla přijata jako standard IEEE 802.15.1-2005.

Mezi hlavní změny patří využití adaptivní přeskokování AHF, rychlejší připojení mezi dvěma zařízeními, přepracování vrstevového modelu pro přenos dat, a to především na základní vrstvě, využití logického přenosu eSCO pro rychlejší přenos hlasových dat, vylepšená detekce chyb a řízení toku. Pro kanály logického přenosu eSCO byly zavedeny nové typy paketů EV. Představeny byly rozšířené režimy pro protokol L2CAP a nová transportní vrstva HCI pro tři drátový UART. [5]

2.2 Druhá generace Bluetooth

Specifikace 2.0 byla vydána v říjnu 2004 a její hlavní změnou oproti specifikaci 1.2 je použití funkce pro rychlejší přenos dat EDR (*Enhanced Data Rate*), který používá nový způsob modulace dat. Díky použití nové modulace se přenosová rychlost zvyšuje až na 3 Mbit/s.

Specifikace 2.1 byla vydána v červenci 2007 a je evolucí předchozího standardu. Mezi nejvýznamnější nové funkce patří systém bezpečného párování mezi zařízeními SSP (*Simple Security Pairing*), rozšířená odpověď na vyhledávací dotaz EIR (*Extended Inquiry Response*) nebo funkce *sniff subrating*, která umožňuje snížit výkon zařízení pomocí omezení pracovního cyklu zařízení.

Další změny byly provedeny například na hostitelském rozhraní HCI a v oblasti bezpečnosti. V této specifikaci byla poprvé přidána podpora pro NFC (*Near Field Communication*). Bluetooth zařízení se dokáže spárovat se zařízením s podporou NFC na vzdálenost několika centimetrů.

2.2.1 Modulace použité pro rychlejší přenos dat

Hlavní změnou oproti předchozím specifikacím je v použití jiných modulací. Ve funkci EDR se přístupový kód a záhlaví paketu moduluje stejně jako v předchozích specifikacích, je tedy použita modulace GFSK. Informační pole je pak modulováno kombinací GFSK a vybrané PSK (*Phase Shift Keying*) modulace.

PSK modulace použitá pro přenos dat o rychlosti 2 Mbit/s je diferenciální kvadturní klíčování fázovým posuvem pootočeným o 45 stupňů $\pi/4$ -DQPSK (*$\pi/4$ rotated Differential Quaternary Phase Shift Keying*).

PSK modulace použitá pro přenos dat o rychlosti 3 Mbit/s je osmistavové diferenciální klíčování fázovým posuvem 8DQPSK (*8 phase Differential Quaternary Phase Shift Keying*). [13]

2.2.2 Formát paketu druhé generace Bluetooth

Paket pro přenos pomocí EDR se skládá z přístupového kódu a záhlaví, které se nijak nemění oproti základnímu typu paketu, viz kapitola 1.2.4.7. Nově je součástí paketu ochranný čas, synchronizační sekvence, informační pole EDR a zápatí, viz obrázek 2.1.

LSB		MSB			
Přístupový kód	Záhlaví	Ochranný čas	Synchronizace	Informační pole EDR	Zápatí
GFSK		DQPSK			

Obrázek 2.1: Formát paketu použitý ve druhé generaci Bluetooth

Ochranný čas se pohybuje v rozmezí 4,75 až 5,25 μ s a vymezuje potřebný čas pro změnu dané modulace.

Synchronizační sekvence má velikost 11 μ s (11 DQPSK symbolů) a generuje bitovou sekvenci pro vybranou DQPSK modulaci.

Zápatí obsahuje dva nulové znaky. Pro modulaci $\pi/4$ -DQPSK 00,00, pro 8DQPSK 000,000. [13]

2.2.3 Typy paketů

Pro přenos dat na logickém přenosu eSCO se používá čtveřice nových typů paketů:

- 2-EV3 paket – nese až 60 bajtů informace a používá se při modulaci $\pi/4$ -DQPSK.
- 2-EV5 paket – nese až 360 bajtů informace a používá se při modulaci $\pi/4$ -DQPSK.
- 3-EV3 paket – nese až 90 bajtů informace a používá se při modulaci 8DQPSK.
- 3-EV5 paket – nese až 540 bajtů informace a používá se při modulaci 8DQPSK.

Šest nových paketů bylo přidáno pro EDR přenos dat na logickém kanálu ACL:

- 2-DH1 paket – nese až 56 bajtů informace a používá se při modulaci $\pi/4$ -DQPSK.
- 2-DH3 paket – nese až 369 bajtů informace a používá se při modulaci $\pi/4$ -DQPSK.
- 2-DH5 paket – nese až 681 bajtů informace a používá se při modulaci $\pi/4$ -DQPSK.
- 3-DH1 paket – nese až 85 bajtů informace a používá se při modulaci 8DQPSK.
- 3-DH3 paket – nese až 554 bajtů informace a používá se při modulaci 8DQPSK.
- 3-DH5 paket – nese až 1023 bajtů informace a používá se při modulaci 8DQPSK.

Všechny tyto pakety vycházejí z paketů používaných při základním přenosu dat. Více informací lze nalézt v kapitole 1.2.4.11. [13]

2.2.4 Jednoduché bezpečné párování

Hlavním cílem jednoduchého bezpečného párování je zjednodušit uživatelům celý proces párování a zlepšit bezpečnost Bluetooth.

SSP má z hlediska bezpečnosti dva hlavní cíle, a to ochranu proti odposlechu a ochranu vůči tzv. *man-in-the-middle* útokům.

Až do specifikace 2.0 se používalo párování, u kterého jsme chtěli jistou úroveň bezpečnosti, založené na použití PIN kódu mobilního zařízení. Tento PIN kód je typicky pouze čtyřmístný a jeho prolomení bylo snadné.

SSP používá Diffie-Hellmannův protokol s využitím eliptických křivek. Tento protokol dovoluje dvěma zařízeními posílat tajnou informaci na nezabezpečeném kanálu, využívá se systém veřejného a privátního klíče. Informace má tvar 192 bitového náhodného čísla, prolomení je zde velmi složité a zabere spoustu času. Tato ochrana se používá především pro ochranu proti odposlechu.

Ochrana komunikace proti útokům *man-in-the-middle* je složitější. Tento útok nastává, když se mezi dvě párovaná zařízení vměstná třetí zařízení, ke kterému jsou obě zařízení připojeny. Zde se jako ochrana používá porovnání čísel a zadání propojovacího kódu. [5, 14]

2.2.5 Rozšířená odpověď na vyhledávací dotaz

EIR může poskytnout více informací než základní odpověď na vyhledávací dotaz. Umožní lepší filtrování zařízení před zahájením procesu připojování než při použití indikátoru síly výkonu RSSI. Pro přenos informace používá ACL pakety DM1, DM3, DM5, DH1, DH3, DH5. V jednom paketu tak lze poslat více informací najednou a ušetří tak čas pro zahájení připojování. [14]

2.3 Třetí generace Bluetooth

Specifikace Bluetooth 3.0 + HS (*High Speed*) byla vydána v dubnu 2009 a poskytla teoretický přenos dat rychlostí až 24 Mbit/s. Tato rychlost však není dosažena přes samostatné Bluetooth spojení. Vysoké rychlosti můžeme dosáhnout v případě, že obě zařízení podporují wi-fi, tedy standard 802.11.

Největší změnou v hardwaru Bluetooth je umístění druhé řídicí části AMP (*Alternative MAC/PHY*). Tato část je potřebná k vysokorychlostnímu přenosu dat, vytváří spoj na základě standardu 802.11 mezi dvěma zařízeními. Základní řídicí část se nyní označuje jako BR/EDR (*Basic Rate/Enhanced Data Rate*). Mezi další vylepšení můžeme zahrnout nové režimy pro vrstvu L2CAP, systém pro jednosměrný bezspojový přenos dat UCD (*Unicast Connectionless Data*) nebo vylepšenou kontrolu výkonu zařízení.

Zařízení výrobců mohou použít specifikaci 3.0 i bez podpory vysokorychlostního přenosu dat. Takové zařízení nemá příponu „HS“. [5, 15]

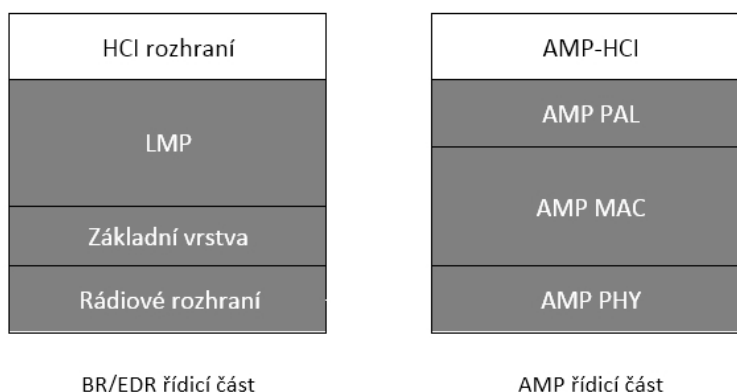
2.3.1 Řídicí část pro vysokorychlostní přenos dat

AMP je sekundární řídicí částí v jádru Bluetooth systému. Jednotlivé zařízení může obsahovat jednu, více nebo žádnou AMP řídicí část. Pokud se sestaví kanály L2CAP mezi dvěma zařízeními skrze řídicí část BR/EDR, protokol pro správu AMP (*AMP Manager*) může detekovat AMP řídicí část na druhém zařízení. Pokud jsou AMP řídicí části aktivní na obou zařízeních, přesune se datový provoz z BR/EDR části do AMP části.

Každá AMP řídicí část se skládá z fyzické vrstvy AMP PHY (*PHYsical*), základní vrstvy AMP MAC (*Media Access Control*). Nad těmito vrstvami je definována vrstva pro adaptaci protokolů PAL (*Protocol Adaptation Layer*). Tato vrstva se stará o mapování Bluetooth protokolů na specifické protokoly vrstev PHY a MAC.

Vrstva L2CAP může vytvořit kanály spolupracující s AMP. Pokud nastane na fyzickém spoji AMP krátkodobé odstavení nebo není potřeba vzhledem k velikosti dat takové přenosové kapacity, spojí se kanál L2CAP s BD/EDR řídicí částí.

AMP řídicí část může být v případě potřeby programově zastavena, aby se minimalizovala spotřeba Bluetooth zařízení.



Obrázek 2.2: Vrstvy AMP řídicí části ve srovnání s BR/EDR

AMP PHY je fyzickou vrstvou řídicí části.

MAC vrstva je definovaná v referenčním modelu standardu IEEE 802. Tato vrstva provádí adresaci, kontrolu a přístup ke kanálům.

Na této vrstvě byly nové fyzické kanály a logické spoje pro vrstvý model přenosu dat. Jsou to:

- Fyzický kanál AMP (*AMP Physical Channel*) – kanál se vytvoří během normální komunikace mezi dvěma zařízeními s podporou AMP.
- Fyzický spoj AMP (*AMP Physical Link*) – vytvoří spojení mezi dvěma zařízeními s řídicí částí AMP.
- Logický spoj pro řízení AMP spoje AMP-C (*AMP Control*) – jedná se o logický spoj reprezentující spojení vrstvy AMP PAL.
- Uživatelský asynchronní/izochronní logický spoj pro AMP AMP-U (*AMP User Asynchronous/Isochronous*) – přenáší všechna asynchronní a izochronní data. Na rozdíl od ACL-U logického spoje podporuje přenos dat více logických spojů v jednom fyzickém spoji.

AMP PAL je vrstvou, která propojuje AMP MAC s hostitelskou částí (L2CAP a protokol pro správu AMP). Překládá příkazy z hostitelské části na příkazy srozumitelné pro AMP MAC vrstvu, a naopak. Také poskytuje podporu pro správu AMP kanálu, řídí datový provoz na základě specifikací řízení toku a spravuje výkon AMP řídicí části.

Je to logické rozhraní propojující hostitelskou část s řídicí částí. HCI rozhraní se používá, pokud jsou tyto dvě části fyzicky rozděleny. Tato vrstva používá příkazy pro správu fyzických a logických spojů nebo správu kvality služeb QoS. Jedna transportní vrstva HCI může multiplexovat několik AMP řídicí částí do jedné fyzické sběrnice, v případě, kde více řídicích částí existuje v různých fyzických jednotkách. [15]

2.3.2 Jednosměrný bezspojoyý přenos dat

Jednosměrný bezspojoyý přenos dat se váže k vrstvě L2CAP. Přenos dat na vrstvě L2CAP může probíhat buď spojoyvě, kdy se data přenáší oběma směry, nebo bezspojoyvě. Tento typ přenosu trpěl občasnými latencemi v průběhu přenosu z důvodu velkého množství posílaných najednou.

Tento nedostatek je vyřešen automatickým uvolňováním kanálu, přes který se posílají data, a to v pevně daných intervalech. Kanál se tak nebude zahlcovat velkým množstvím dat. Uvolňování dat během přenosu lze nastavit pomocí příkazů vrstvy HCI. [5, 15]

2.3.3 Nové režimy L2CAP ve třetí generaci Bluetooth

Ve specifikace 3.0 byly ke třem L2CAP režimům přidány další, a to:

- rozšířený režim opětovného přenosu (*Enhanced Retransmission Mode*),
- režim datového toku (*Streaming Mode*).

Rozšířený režim opětovného přenosu se využívá pro pakety přenášené přes AMP kanály. Pokud bude paket chybný nebo se nepřenese, paket se opětovně přenese. Jedná se o spolehlivý přenos dat. Režim datového toku se používá pro izochronní přenos dat v reálném čase. Datové jednotky zde nejsou potvrzovány. Jedná se o nespolehlivý přenos dat. [15]

2.4 Čtvrtá generace Bluetooth

Specifikace 4.0 byla vydána v červenci 2010. Standard v sobě zahrnuje standardní Bluetooth protokoly, protokoly pro vysokorychlostní přenos dat a protokoly pro nízkou spotřebu Bluetooth LE (*Low Energy*). Jedná se o největší změnu tohoto standardu od svého počátku.

Bluetooth LE je úzce spojeno s řídicí částí BR/EDR. Využívá stejných principů, ale je uzpůsobena pro co nejmenší spotřebu energie. Bluetooth LE může být nasazeno v koncových zařízeních ve dvou režimech:

- Jednoduchý režim – v tomto režimu je implementován pouze čip pro Bluetooth LE, tyto zařízení mají marketingové označení Bluetooth Smart.
- Duální režim – tento režim implementuje LE řídicí část do již existující BR/EDR řídicí části, zařízení s tímto režimem se nazývají Bluetooth Smart Ready.

Mezi základní vlastnosti Bluetooth LE patří velice nízká spotřeba, kvůli tomu i menší přenosová rychlost, nízká cena, schopnost pracovat roky na jedno nabití v zařízeních pracujících s nízkou spotřebou, rozšířený dosah apod. [5]

Specifikace 4.1 byla vydána v prosinci 2013. Jedná se o kompletně softwarové rozšíření předchozí specifikace Bluetooth 4.0. Specifikace obsahuje také dodatky, které vydávala organizace Bluetooth SIG během let 2011 až 2013. Tyto dodatky se označují jako *Bluetooth Core Specification Addenda* (CSA 2, 3 a 4).

Mezi hlavními změnami této specifikace jsou například zlepšení koexistence s mobilní sítí LTE (*Long Term Evolution*), změny v topologii Bluetooth LE, kde nyní může být zařízení zároveň *master* a *slave*, což v předchozí specifikaci nebylo možné, podpora spojově orientovaného L2CAP kanálu pomocí nového L2CAP režimu nebo vylepšení bezpečnosti pro Bluetooth LE. [5]

Specifikace 4.2 byla vydána v prosinci 2014. Tato specifikace vylepšuje především bezpečnost pro zařízení s řídicí částí LE. Zvětšuje informační pole LE paketů na 2056 bitů, což umožňuje přenést větší množství informace.

Tato specifikace také představila vylepšení, týkající se "Internetu Věcí" (*Internet of Things*), který můžeme chápat jako síť zařízení, propojených s internetem. Propojení by mělo být bezdrátové a mělo by být schopné komunikovat se systémy napříč celou sítí. Bluetooth 4.2 tak představilo například protokol 6LoWPAN (*IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*) a s ním protokol IPv6, které jsou dostupné přes nový profil IPSP (*Internet Protocol Support Profile*), díky kterému je možné spojení s internetem. [5, 16, 19]

2.4.1 Základní popis Bluetooth Low Energy

Stejně jako BR/EDR i tato řídicí část pracuje v nelicencovaném pásmu 2,4 GHz. Aby se zabránilo nežádoucím interferencím, používá se modulace frekvenčních přeskoků FHSS. Modulace dat obstarává modulace GFSK. Minimální výkon na výstupu se rovná 0,01 mW (-20 dBm). Standard podporuje přenos dat rychlostí až 1 Mbit/s.

LE používá dvě metody mnohonásobného přístupu, a to frekvenční přístup FDMA (*Frequency Division Multiplex Access*) a časový přístup TDMA. Při použití FDMA se vytvoří 40 subkanálů v rozmezí 2 MHz. Tři z těchto kanálů jsou propagační. Zbytek patří mezi kanály datové. TDMA je používáno v případě, kdy zařízení posílá paket v předem stanoveném čase a zařízení přijímající odpoví paketem vysílaným po předem stanoveném čase.

Fyzický kanál je rozdělen do časových jednotek nazývaných jako události. Existují dva typy událostí:

- propagační události,
- připojovací události.

Zařízení, které vysílá propagační pakety, se nazývá propagátor. Zařízení, které přijímají propagační pakety, ale nechtějí se spojit s propagátorem, se nazývají skenery. Tato komunikace probíhá na vyhrazených propagačních kanálech. Komunikace pomocí propagačních událostí umožňuje broadcastový nebo jednosměrný přenos dat mezi dvěma nebo více zařízeními.

Zařízení, které se chtějí připojit, používají propagační pakety určené k připojení. Tyto zařízení se nazývají iniciátoři. Pokud iniciátor přijme propagační paket, může navázat spojení. Iniciátor se stane *master* a propagátor se stane zařízením *slave*. Připojovací události jsou používány pro přenos paketů mezi těmito zařízeními. Přenos paketů vždy inicializuje *master*.

Nad fyzickým kanálem se nachází další spoje, kanály a protokoly. Uvnitř fyzického kanálu se vytvoří fyzický spoj mezi *master* a *slave*. Každý *slave* může být připojen k *master* pouze jedním fyzickým spojem. V jednom fyzickém spoji lze přenášet více logických spojů, které podporují asynchronní provoz. Zařízení, které jsou v pikosíti aktivní, jsou spojeny základním kanálem logického přenosu LE ACL (*LE Asynchronous Connection*). Tyto podvrstvy spravuje základní vrstva v řídicí části.

Vrstva L2CAP provádí fragmentaci, defragmentaci přenášených dat a multiplexování, demultiplexování více kanálů sdílejících jeden logický spoj. Nad touto vrstvou jsou definované dva protokoly. Protokol správy bezpečnosti SMP (*Security Manager Protocol*), který používá pevné L2CAP kanály ke zlepšení bezpečnosti při komunikaci mezi dvěma zařízeními. Druhým protokolem je atributový protokol ATT (*ATtribute protocol*), který implementuje spojení mezi atributovým klientem a atributovým serverem.

Co se týče bezpečnosti, Bluetooth LE využívá pro potřeby zabezpečeného párování podobných principů jako specifikace 2.1, tedy jednoduché párování SSP. Velkou změnou je však použití šifer CCM (*Counter with cipher block Chaining-Message authentication code*) a AES-128 (*Advanced Encryption Standard*). [17]

2.4.2 Architektura Bluetooth Low Energy

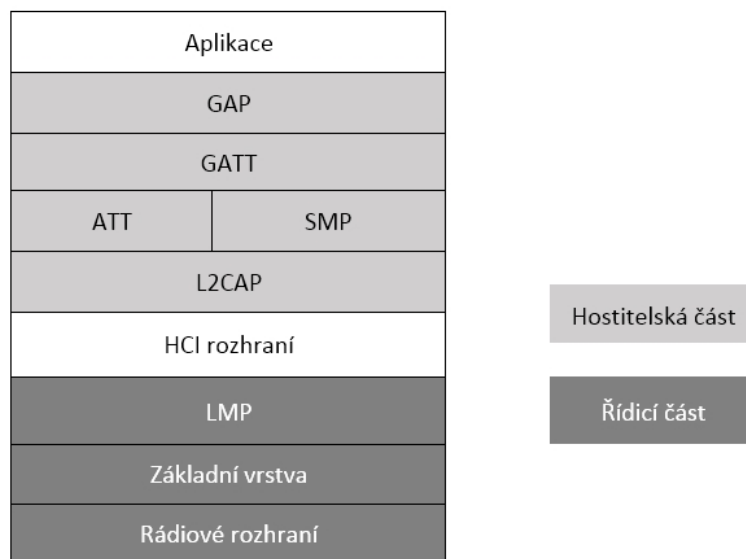
Architektura Bluetooth LE je velmi podobná BR/EDR. Spodní čtyři vrstvy jsou sdílené, pouze jejich funkce se od sebe liší. Řídicí část se skládá z rádiové vrstvy, základní vrstvy a vrstvy pro správu spojení, jehož součástí je protokol LMP. Řídicí část komunikuje s hostitelskou částí pomocí HCI.

Hostitelská část se skládá z vrstvy pro řízení a adaptaci spojení L2CAP, protokolu správy bezpečnosti SMP, atributového protokolu ATT, hlavního atributového profilu GATT (*Generic ATtribute profile*) a přístupového profilu GAP. Nástin jednotlivých vrstev je na obrázku 2.3.

2.4.3 Základní vrstva Bluetooth Low Energy

Z vrstev v řídicí části se základní vrstva nejvíce odlišuje od podobné vrstvy v řídicí části BR/EDR. Změny na rádiovém rozhraní jsou již popsány v kapitole 2.4.1. Základní vrstva zajišťuje sestavení a přeposílání paketů rádiovému rozhraní pro samotný přenos mezi zařízeními. Definuje také topologii sítě a stavy Bluetooth zařízení. O tyto procedury se stará protokol pro kontrolu základní vrstvy LLCP (*Link Layer Control Protocol*).

Základní vrstva pro Bluetooth LE podporuje filtrování zařízení na základě příbuzných adres zařízení. Zařízení tak může odpovídat menšímu množství dalších zařízení. Každé zařízení v určitém stavu (propagátor, skener, iniciátor) má své pravidla pro filtrování.



Obrázek 2.3: Architektura Bluetooth LE

2.4.3.1 Pakety Bluetooth Low Energy

Bluetooth LE používá jen jeden formát paketu, viz obrázek 2.4. Ten se používá jak v propagačních událostech, tak pro přenos dat jako datový paket. Samotný paket se skládá z těchto polí:

- **Preamble** – tato část je použita při přijímání paketu a určuje frekvenční synchronizaci, časování pro příjem symbolů a automatickou kontrolu zisku.
- **Přístupová adresa** – pro propagační paket je adresa vždy stejná, pro datový paket se musí měnit pro každé spojení vytvořené mezi zařízeními. Tuto adresu vytváří pouze iniciátor.
- **Datová jednotka PDU** – datové jednotky se rozdělují na datovou jednotku pro propagační paket a datovou jednotku pro datový paket.
- **CRC** – každý paket musí mít na konci zabezpečení cyklickým kódem.



Obrázek 2.4: Formát paketu Bluetooth LE

Nejdůležitější částí jsou datové jednotky. V propagační datové jednotce se nachází 16 bitové záhlaví a informační pole libovolného rozsahu. Maximálně však může být datová

jednotka velká až 312 bitů. Záhlaví je znázorněno na obrázku 2.5. Skládá se z následujících polí:

- Typ datové jednotky – určuje typ propagačního paketu. Těchto typů je sedm a rozdělují se na typy pro propagaci (4 typy), skenování (2 typy) a připojení (1 typ). Velikost tohoto pole je 4 bity.
- RFU (*Reserved for Future Use*) – tyto pole jsou 2 bitové a jsou určena pro budoucí použití. Jsou tedy nulové.
- Tx, Rx adresa – tyto pole uchovávají informace specifické ke každému typu datové jednotky.
- Délka – indikuje velikost informačního pole celého paketu.

LSB	4 b	2 b	1 b	1 b	6 b	2 b	MSB
	Typ datové jednotky	RFU	Tx Adresa	Rx Adresa	Délka	RFU	

Obrázek 2.5: Záhlaví propagačního paketu

Datová jednotka pro přenos dat je v základu stejná jako pro propagaci, ale může obsahovat pole pro zabezpečení zprávy (*Message Integrity Check*). Záhlaví je 16 bitové. Je znázorněno na obrázku 2.6 a skládá se z těchto polí:

- LLID (*Link Layer ID*) – 2 bitové pole definující formát informačního pole.
- NESN (*nextExpectedSeqNum*) – toto pole slouží pro potvrzení poslední přijaté datové jednotky. Velikost pole je 1 bit.
- SN (*transitSeqNum*) – identifikuje paket posílaný přes základní vrstvu. Velikost pole je 1 bit.
- MD (*More Data*) – má dva stavy (0 a 1) a indikuje, zda zařízení ještě bude posílat další data. Velikost pole je 1 bit.
- RFU – pole určené pro budoucí použití. Velikost těchto polí jsou 3 bity.
- Délka - indikuje velikost informačního pole celého paketu. Velikost informačního pole se pohybuje od 0 bitů do 248 bitů.

Existuje daný časový interval pro posílání dvou paketů na jednom fyzickém kanálu. Tento interval se nazývá mezirámcový prostor a je délka je 150 μ s. [17]

LSB	2 b	1 b	1 b	1 b	3 b	5 b	3 b	MSB
	LLID	NESN	SN	MD	RFU	Délka	RFU	

Obrázek 2.6: Záhloví datového paketu

2.4.3.2 Režimy jednotek Bluetooth Low Energy

Operace na základní vrstvě se dají popsat v pěti režimech. Pouze jeden z těchto režimů může být na zařízení aktivní. Základní postup při vyhledávání a připojování dvou, či více zařízení k sobě je již popsán v kapitole 2.4.1. Mezi režimy jednotek patří: [17]

- Režim pozastaven - výchozí stav zařízení. V tomto stavu zařízení nevysílá ani nepřijímá pakety.
- Režim propagační - zařízení vysílá pakety s propagační datovou jednotkou v příslušných propagačních událostech. Propagační událost se uzavře po odeslání stejné propagační datové jednotky do všech propagačních kanálů.
- Režim skenování - v režimu skenování naslouchá zařízení propagačním paketům. Skenování může být pasivní nebo aktivní. V pasivním skenování zařízení pouze přijímá pakety. V aktivním skenování může při obdržení propagačního paketu s požadovaným typem datové jednotky požádat propagátora o poslání dalších informací.
- Režim inicializování - iniciátor naslouchá na propagačních kanálech na propagační paket s datovou jednotkou určenou pro připojení. Po úspěšném přijetí správného typu datové jednotky se mezi zařízeními naváže spojení.
- Režim připojení - zařízení se nachází v režimu připojení, pokud je spojeno s jiným. Základní vrstva může posílat datové pakety v připojovacích událostech. Jedna připojovací událost se provádí na jednom datovém fyzickém kanálu.

2.4.4 Změny ve vrstevném modelu přenosu dat

Díky novému systému Bluetooth LE bylo nutné vytvořit nové modely přenosu dat. Nové kanály či spoje se objevily ve všech čtyřech podvrstvách vrstevného modelu pro přenos dat.

Pro Bluetooth LE byly přidány dva fyzické kanály: [17]

- LE kanál pikositě (*LE Piconet Channel*) – tento fyzický kanál je využit při běžném přenosu mezi dvěma připojenými zařízeními.
- Fyzický kanál pro propagační broadcast (*Advertisement Broadcast Channel*) – tento kanál je použit pro zřízení připojení nebo pro broadcastový přenos dat mezi nepřipojenými zařízeními.

S fyzickými kanály jsou pak úzce spojeny také fyzický spoj aktivního LE (*LE Active Physical Link*) a fyzický spoj propagace LE (*LE Advertising Physical Link*).

Byly definovány dva nové kanály pro logický přenos: [17]

- Asynchronní logický přenos LE ACL – zařízení *master* a *slave* jsou k sobě připojena tímto kanálem. LE ACL nese logické spoje a L2CAP kanál určený k signalizaci a přenos asynchronních dat.
- Broadcastový logický přenos pro propagaci ADVB (*ADVERTISING Broadcast*) – logický přenos pro přenos broadcastových dat do všech dostupných zařízení ve skenovacím režimu.

Bluetooth LE definuje 4 logické spoje, které se můžou přenášet uvnitř kanálů logického transportu. Tyto spoje jsou rozlišeny odlišným LLID, který se přenáší v záhlaví datové jednotky paketu, přenášejícího data. Mezi logické spoje patří: [17]

- Logický spoj pro řízení LE spoje LE-C (*LE Control*) – tento logický spoj přenáší signalizaci mezi zařízeními v pikosíti.
- Uživatelský asynchronní logický LE spoj LE-U (*User Asynchronous LE*) – logický spoj přenáší veškerá asynchronní data. Je přenášen přes logický transport LE ACL.
- Logický spoj pro řízení ADVB spoje ADVB-C (*ADVB Control*) – logický spoj přenáší signalizaci mezi všemi nespojenými zařízeními.
- Uživatelský asynchronní logický ADVB spoj ADVB-U (*ADVB User data*) – logický spoj přenáší broadcastová uživatelská data mezi nespojenými zařízeními.

2.4.5 Protokol správy bezpečnosti

SMP je *peer-to-peer* protokol, který se stará o generování šifrovacích klíčů a klíčů identity. Pro svůj provoz používá pevného L2CAP kanálu. SMP také šifrovací klíče skladuje a je zodpovědný pro generování náhodných adres pro známá zařízení. Tento protokol se používá pouze v Bluetooth LE. Podobnou funkci jako tento protokol má v BR/EDR části protokol LMP. [17]

2.4.6 Atributový protokol

ATT je *peer-to-peer* protokol pro komunikaci mezi atributovým klientem a atributovým serverem. ATT klient komunikuje s ATT serverem pomocí pevného L2CAP kanálu. ATT klient posílá příkazy a potvrzování na ATT server, který zpátky posílá odpovědi. ATT klient tak čte v seznamu atributů ATT serveru. [17]

2.4.7 Hlavní atributový profil

GATT reprezentuje atributový server a atributový klient. Profil uchovává informace o službách, profilech a attributech v seznamu příslušného serveru. K těmto informacím lze přistupovat pomocí atributového protokolu ATT. GATT je používán pouze pro zařízení Bluetooth LE. [17]

2.4.8 Dodatek 2

Tento dodatek k Bluetooth LE byl vydán v prosinci 2011. Obsahoval menší změny v přístupovém profilu GAP, kde se přidaly datové typy pro propagaci zařízení a rozšířenou odpověď na vyhledávací dotaz. Změny se dotkly i vrstvy HCI, kde se změnila architektura pro podporu zvuku. Posledním dodatkem pak byla podpora standardu 802.11n pro vrstvu AMP PAL v řídicí části AMP. [18]

2.4.9 Dodatek 3

Dodatek byl vydán v červenci 2012. Tento dodatek obsahoval změny pro určité služby v profilu GAP, například pro autentizaci nebo připojení, případně změny v adresování koncových zařízení v duálním režimu.

Na vrstvě HCI byly přidány informační příkazy pro komunikování transportní vrstvy se zařízením, používající jiné bezdrátové sítě, které by mohly rušit spojení mezi Bluetooth zařízeními. Mohou se tak domluvit na používání jiných frekvencí a nemusí se tak navzájem rušit. Díky tomuto vylepšení musely být vytvořeny dvě nové transportní vrstvy pro komunikaci mezi řídicí částí Bluetooth systému a zařízením, používající jinou bezdrátovou mobilní síť. Tyto transportní vrstvy byly vytvořené na základě sériového rozhraní UART, a to na standardním poloduplexním nebo plně duplexním spojení. [18]

2.4.10 Dodatek 4

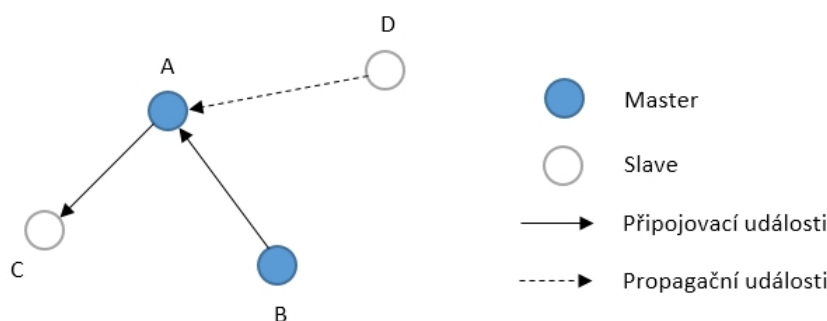
Dodatek byl vydán v únoru 2013. Největší změnou je přidání broadcastového bezspojevého fyzického spoje pro zařízení *slave*. Tento fyzický spoj zajišťuje jednosměrný přenos dat pro zařízení s řídicí částí BR/EDR, které chtějí posílat data z jednoho *master* na více zařízení *slave*. Pokud zařízení chce naslouchat paketům, určených pro tento přenos dat, vytvoří se kanál logického přenosu CSB (*Connectionless Slave Broadcast*). Je potřeba zdůraznit, že tento typ logického přenosu nepřenáší logický spoj určený pro přenos asynchronních dat kanálů L2CAP, nýbrž se uvnitř kanálu přenáší logický spoj PBD (*Profile Broadcast Data*). Logický spoj PBD je podobný spojům SCO-S a eSCO-S, které posílají data v pevném intervalech.

Kvůli broadcastovému jednosměrnému fyzickému spoji pro zařízení *slave* bylo nutné vytvořit nový fyzický kanál, který sice tento spoj nepřenáší, ale je nutný k jeho správnému fungování. Samotný fyzický spoj se přenáší na adaptivním fyzickém kanálu piko-sítě. Novým kanálem je pak fyzický kanál pro synchronizační skenování (*BR/EDR Synchronization Scan Physical Channel*), který je použit zařízením pro obdržení informací o časování a frekvencích použitých pro přenos broadcastových dat.

Dalším dodatkem pak je například rychlý interval pro posílání propagačních paketů, který umožňuje určit řídicí části, za jak dlouho lze vytvořit spojení mezi zařízeními. Časový rozsah je od 20 ms do 10,24 s. [18]

2.4.11 Topologie Bluetooth Low Energy

Největší změnou ve specifikaci 4.1 je možnost pro zařízení zároveň pracovat jako *master* a *slave*. Zařízení tak například mohou spolu komunikovat skrze prostředníka. Taková komunikace je znázorněna na obrázku 2.7. Zařízení A je *master* pro zařízení C, a zároveň je *slave* pro zařízení B. V těchto pikosítích pak probíhá komunikace pomocí přiřizovacích událostí. Zařízení D (iniciátor) se pokouší spojit se zařízením A. Pokud by se navázalo spojení, bylo by zařízením A *master* pro C a *slave* pro zařízení B i D. [18]



Obrázek 2.7: Příklad spojení zařízení ve specifikaci 4.1

2.4.12 Režim L2CAP pro Low Energy data

Ve specifikaci 4.1 byl přidán nový režim pro řízení toku LE dat. Tento režim se stará o kontrolu toku LE dat použitím spojově orientovaných kanálů vytvořených na základě kreditového schématu vytvořeného z L2CAP dat. Nepoužívá se zde L2CAP signalizace. Toto je jediný režim, kde může Bluetooth LE použít k přenosu dat spojově orientovaný kanál. [18]

2.4.13 Zabezpečené spojení pro základní řídicí část

Zabezpečené spojení je režim pro zařízení s BR/EDR řídicí částí, které se chtějí spárovat párováním SSP. Zabezpečené spojení Diffie-Hellmanův protokol s eliptickou šifrou, jejíž vytvořená informace má tvar 256 bitového náhodného čísla. Tento protokol je použit pro autentizaci. Pro šifrování používá AES-CCM šifru stejně jako specifikace 4.0. [18]

2.4.14 Low Energy soukromí

První verze LE soukromí se objevila už v předchozí specifikaci, ale zde se tato funkce zdokonalila. LE soukromí pracuje na základní vrstvě. Při použití této funkce se veřejná

adresa zařízení BD_ADDR zakryje za náhodnou privátní adresu, která má stejný formát a ostatním zařízením se jeví jako normální veřejná adresa.

Tato funkce se používá především pro ochranu před sledováním zařízení. Privátní adresa by se měla v pravidelných intervalech měnit, avšak pokud se adresa mění příliš často, může to mít vliv na samotné spojení s jiným zařízením. [19]

2.4.15 Zabezpečené spojení pro řídicí část Low Energy

Je velice podobné zabezpečenému spojení BR/EDR, které bylo poprvé představeno v minulé specifikaci. Protokol SMP teď generuje šifrovací klíče na základě protokolu Diffie-Hellmann. Ten vytvoří 256 bitů dlouhé náhodné číslo pro autentizaci během párování, pro šifrování se využívá AES-CCM šifrování. [19]

2.5 Používané čipy

V začátcích Bluetooth se nejvíce implementovaly čipy na základních deskách, později v headsetech nebo mobilních telefonech. Mezi výrobce, kteří začaly vyrábět tyto čipy, patří IBM, která se však zaměřovala čistě na počítačové komponenty.

První generaci Bluetooth čipů vyráběly především dvě výrobní společnosti CSR a Texas Instruments. Čipy CSR byly výhodné v tom ohledu, že firma vyráběla pro více výkonových tříd zároveň. Čipy těchto společností se používali hlavně v mobilních telefonech a headsetech. Čipy s prvními verzemi Bluetooth se již masově nevyrábějí a jejich dostupnost je omezená.

Čipy druhé generace jsou i v současnosti vyráběny a osazovány do určitých přístrojů. Vedle typických dodavatelů CSR a Texas Instruments se objevovali další jako například ConnectBlue, LM Technologies, Silicon Labs nebo Broadcom.

Samotné čipy se dělí do různých skupin podle použití, čipsety, které by uměly komunikovat skrze všechny dostupné profily, se nepoužívají. Největší firmy pro výrobu koncových komunikačních zařízení jako Apple, Samsung, používají především čipy firmy CSR.

Čipy pro verzi Bluetooth 3.0 jsou především záležitostí firmy CSR a Silicon Labs. Pro tyto čipy byla důležitá spolupráce s čipem technologie 802.11, čili wi-fi.

Čtvrtá generace Bluetooth se rozdělila na čipy v jednoduchém a duálním režimu. Čipy v jednoduchém režimu byly většinou nízkovýkonové a určené k výdrži i několik let. Jejich velikost je v jednotkách milimetrů, kdežto čipy v duálním režimu mohou být až trojnásobně velké. [20]

2.6 Srovnání Bluetooth specifikací

Vývojových standardů Bluetooth je celá řada a ne všechny jsou evolucí toho předešlého. Dva standardy se od sebe mohou lišit v mnoha ohledech a jsou určeny pro jinou oblast komunikace. Všechny novější specifikace jsou však kompatibilní se staršími, ale v takovém případě se využívá vlastností staršího standardu.

Výrobce	Výrobní označení	Specifikace	Výkonová třída	Příklad použití
Free2Move	F2M03C1-101	1.1	1	Mobilní telefony, počítačové periférie
CSR	BC57E687C-ATB-E4	2.0	2, 3	Bezdrátové head-sety
CSR	BC57E687B-ITB-E4	2.1	2, 3	Stereo sluchátka, reprosoustavy
Texas Instruments	CC2541F256RHAT	4.0	3	Spotřební elektronika

Tabulka 2.1: Příklady čipů Bluetooth [20]

První generace se již v současnosti nevyužívá. Specifikace s označením 2.0 a 2.1 přinesly rychlejší přenos dat, vylepšenou výdrž a hlavně bezpečnost. Bluetooth 3.0 je určen pro vysokorychlostní přenos dat skrze wi-fi spojení. Používá se tak u zařízení s implementovanou technologií wi-fi. Čtvrtá generace přinesla technologii Low Energy s velmi nízkou energetickou náročností, zvýšený dosah a dočkala se rozšíření do nových technologických oblastí.

	Bluetooth 1.1	Bluetooth 1.2	Bluetooth 2.0	Bluetooth 2.1	Bluetooth 3.0	Bluetooth LE
Přenosová rychlost [Mbit/s]	0,721	0,721	2 nebo 3	2 nebo 3	24	24
Zpětně kompatibilní	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
AHF	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Párování SSP	Ne	Ne	Ne	Ano	Ano	Ano
802.11 PAL	Ne	Ne	Ne	Ne	Ano	Ano
Podpora NFC	Ne	Ne	Ne	Ano	Ano	Ano

Tabulka 2.2: Srovnání specifikací

3 Přehled komunikačních zařízení s technologií Bluetooth

Technologie Bluetooth se v současnosti nasazuje do spousty typů zařízení a jsou určeny pro bezdrátovou komunikaci v nejrůznějších odvětvích. Nejznámějšími zástupci jsou již od počátku mobilní zařízení, tedy mobilní telefony, později chytré telefony a tablety.

3.1 První mobilní zařízení

V roce 2000 se na trhu začali objevovat první zařízení s implementovaným čipem Bluetooth. Jako první mobilní zařízení se představil Ericsson T36 v roce 2000. Tento telefon však nikdy nevstoupil do volného prodeje. O další rok později jej následovaly další zařízení firmy Ericsson, všechny osazené čipem specifikace 1.0b. Použitelnost služeb byla však kvůli nestabilnímu připojení mizivá a ostatní společnosti tak počkali na novou, vylepšenou specifikaci 1.1. [10]

Nokia představila svůj první telefon s Bluetooth v roce 2001, již s verzí 1.1. Využívalo se profilů definovaných ve specifikaci 1.0b, společně s profily, jejichž specifikace byly vydány později. Mezi ně patřil například populární profil HFP pro připojení mobilního telefonu k automobilovému hands-free setu. Důležité je poznamenat, že jednotlivé služby (profily) musí být přítomny v obou zařízeních, v opačném případě nebude služba fungovat. Seznam základních a dalších vybraných profilů naleznete v kapitole 1.2.10. [21, 22]

Zařízení	Rok výroby	Verze Bluetooth	Příklady použitých profilů
Ericsson T36	2000	1.0b	-
Ericsson T68	2001	1.0b	HSP, OPP, SYNCH
Nokia 6310	2001	1.1	HFP, HSP, OPP, FTP
Sony Ericsson T630	2003	1.0b	HFP, HSP, FTP

Tabulka 3.1: Vybraná zařízení s první generací Bluetooth

3.2 Rozmach technologie Bluetooth v mobilních zařízeních

Po vydání specifikace 2.0 se začalo Bluetooth nasazovat do naprosté většiny mobilních zařízení. Standard s označením 2.0 se implementoval především do vlajkových lodí jednotlivých výrobců, kdežto o generaci nižší verzi 1.2 se implementovala do levnějších modelů.

Díky zvýšené přenosové rychlosti nasazením novější specifikace je možno využívat v mobilních zařízeních profilu A2DP pro přenos kvalitního stereo zvuku mezi přístroji. Dále byla přidána podpora profilů pro dálkové ovládání televizorů, Hi-fi stanic, klávesnic, myši, služba pro propojení více zařízení s technologií Bluetooth do jedné sítě PAN (*Personal Area Network*) nebo služba určená pro získání dat SIM karty příslušného telefonu jiným zařízením. [21, 22]

Všechny zařízení specifikace 2.0 jsou zpětně kompatibilní s nižšími verzemi, avšak při připojení dvou zařízení s různými specifikacemi se užívají parametry a profily dané nižší verzí.

Zařízení	Rok výroby	Verze Bluetooth	Příklady použitých profilů
Sony Ericsson K750	2005	2.0	HFP, FTP, HID
Nokia 6230	2005	1.2	HFP, SAP
Nokia 6300	2006	2.0	HFP, A2DV, SAP, PAN
Sony Ericsson K800	2006	2.0	HFP, A2DV, HID, PAN

Tabulka 3.2: Vybraná mobilní zařízení z let 2005 a 2006

3.3 Nástup dotykových mobilních zařízení

Na počátku roku 2007 představila americká firma Apple první generaci svého chytrého mobilního telefonu s dotykovým displejem iPhone. Tento telefon byl osazen čipem specifikace 2.0. Kvůli kompletně novému systému a ovládání se u iPhone uplatnila pouze malá část Bluetooth profilů, a to pro přenos hlasu, čili profily HSP a HFP. Ostatní služby museli počkat na přepracování svých specifikací.

iPhone a jeho nástupce iPhone 3G pak následovaly Nokia s dotykové telefony založených na operačním systému Symbian. Nabídka služeb Bluetooth byla aktualizována pro potřeby dotykových mobilů.

První chytré mobilní zařízení se specifikací 3.0 pro vysokorychlostní přenos dat se staly přístroje korejské firmy Samsung, konkrétně typ Galaxy S. Tento telefon pracuje pod operačním systémem Android. Nokia mezitím opustily Symbian přešly na operační systém Windows Phone. [21, 22]

Kromě klasických služeb jako přenos dat a spojení s headsety se objevily aplikace k zabránění krádeži nebo ztrátě určité věci, produktu. Chráněná věc je vybavena Bluetooth nálepkou, která neustále komunikuje s mobilním zařízením. Pokud se spojení přeruší, v mobilním zařízení se spustí alarm. Koncept byl poprvé použit v roce 2009. [5]

Zařízení	Rok výroby	Verze Bluetooth	Příklady použitých profilů
iPhone	2007	2.0	pouze HFP, HSP
iPhone 3G	2008	2.0	pouze HFP, HSP
Nokia 5800	2008	2.0	HFP, A2DV, AVRCP
Samsung Galaxy S	2010	3.0	HFP, A2DV, AVRCP
Samsung Galaxy Nexus	2011	3.0	HFP, A2DV, HID
Nokia Lumia 800	2011	2.1	HFP, A2DV

Tabulka 3.3: Vybraná dotyková zařízení druhé a třetí generace

3.4 Zařízení s podporou Bluetooth Low Energy

Oznámení specifikace pro zařízení s velmi nízkým výkonem přineslo mobilním zařízením nové možnosti, hlavně pro komunikaci se zařízeními Bluetooth Smart. Mobilní zařízení byly označeny jako Bluetooth Smart Ready a mohou komunikovat jak se zařízeními s velmi nízkým výkonem, tak s přístroji osazenými staršími verzemi Bluetooth. Zařízení Bluetooth Smart smí komunikovat pouze s Bluetooth Smart Ready. Samozřejmě stále platí podmínka stejných profilů na obou zařízeních. Seznam zařízení schopných komunikovat s výrobky Bluetooth Smart je v současnosti omezený. [23]

Prvním komunikačním zařízením s Bluetooth Low Energy byl iPhone 4S firmy Apple. Ten podporoval standardní služby jako spojení s headsety a přenos kvalitního stereo zvuku, ale například neměl profil pro přímou výměnu dat. Výměna dat mezi jinými značkami než Apple je řešena použitím aplikací třetích stran. [24]

Operační systém Android měl trochu krkolomnější začátky. Zprvu neměli programátoři k dispozici zdrojové kódy, až s nástupem vlajkových lodí jednotlivých výrobců a na podzim roku 2012 se objevily první aplikace pro Bluetooth Low Energy. [25]

V nové specifikaci se vedle dříve definovaných profilů objevují profily pro komunikaci se zařízeními Bluetooth Smart. Tyto profily vychází z hlavního atributového profilu GATT a ne všechny jsou určené pro mobilní zařízení. Nejznámější nabízené služby pro komunikaci mobilního zařízení s jiným jsou následující: [21, 22, 26]

- Služba pro upozorňování, která umožňuje klientovi přijímat informace o zmeškaných hovorech nebo přijatých zpráv od dalšího zařízení.
- Služba pro komunikaci mezi mobilním telefonem a přístrojem pro měření tlaku, srdečního tepu nebo krokoměru.
- Služba pro určení vzdálenosti mezi dvěma zařízeními umožňující například varovat před výpadkem spojení.
- Služba pro automatickou změnu časové zóny, případně samotného času na připojeném zařízení.

Zařízení	Rok výroby	Verze Bluetooth	Příklady použitých profilů
iPhone 4S	2011	4.0	HFP, A2DV, AVRCP, GATT
Samsung Galaxy Note II	2012	4.0	HFP, HSP, A2DV, GATT
Sony Xperia Z1	2013	4.0	HFP, A2DV, GATT
iPhone 6	2014	4.1	HFP, A2DV, AVRCP, GATT
Nokia Lumia 730	2014	4.0	HFP, A2DV, AVRCP, GATT
Samsung Galaxy S6	2015	4.1	HFP, A2DV, AVRCP, GATT

Tabulka 3.4: Zařízení s profily pro Bluetooth Low Energy

Nejnovější specifikaci Bluetooth 4.2 zatím nemá žádný mobilní přístroj. Dá se očekávat jeho nasazení v roce 2016.

4 Oblasti použití technologie Bluetooth

Hlavním důvodem pro vytvoření nové technologie bylo zjednodušení celého procesu komunikace mezi dvěma zařízeními na krátkou vzdálenost. Dosud se na takový přenos používalo sériové rozhraní RS-232. Cíle byly zřejmé – odstranění kabelů a konektorů jednodušším bezdrátovým přenosem. Bluetooth se stal první technologií založenou na podobném principu. [5, 27]

V současnosti jsou čipy technologie Bluetooth rozšířené v několika miliardách unikátních zařízení. Jsou implementovány v mobilních telefonech, přenosných počítačích, v lékařských zařízeních, v automobilovém průmyslu nebo v domácí elektronice. [27]

4.1 Mobilní telefony

Mobilní telefony jsou pro koncové zákazníky nejčastějšími přístroji, kde využívají služeb technologie Bluetooth. V dnešní době převládají tzv. chytré telefony, jejichž výpočetní kapacita je na úrovni počítačů, což umožňuje jednodušší sbírání a analýzu údajů.

Nejnovější chytré telefony obsahují čipy v duálním režimu čtvrté generace Bluetooth. Umožňují tedy komunikaci jak s přístroji Bluetooth Smart, tak s přístroji v klasickém režimu. Mohou sloužit jako „brána“ mezi jednotlivými zařízeními, například pro výše zmíněné sbírání dat. [27]

Typické využití Bluetooth v mobilních telefonech může být následující: [27]

- Propojení s hands-free v automobilech nebo bezdrátovými sluchátky a headsety.
- Komunikace s tablety a počítači, například posílání menších souborů.
- Spojení s chytrými hodinkami, například možnost přijmout, odmítnout hovor na hodinkách bez nutnosti manipulace s telefonem.
- Jednoduchý sběr dat ze senzorů pro měření krevního tlaku, tepu, kroků apod.
- Propojení se zařízeními na určování vzdálenosti. Mobilní telefon je spojen s tímto zařízením, pokud se vzdálí na určitou vzdálenost, spustí se alarm.
- Použití telefonu jako dálkového ovladače, např. pro televizi nebo multimediálního centra.

Chytré telefony také využívají jiných bezdrátových technologií pro párování jednotlivých zařízení. Příkladem může být NFC, které umožňuje velmi rychlé spárování dvou zařízení a na přenos dat je pak použit Bluetooth. [5]

4.2 Počítače, tablety, domácí elektronika

Bluetooth je rozšířené i v zařízeních jako jsou počítače a tablety. Pokud počítač nemá nativní podporu Bluetooth, existuje velká škála Bluetooth adaptérů umožňující připojení přes rozhraní USB. Nejčastějším využitím Bluetooth je pro synchronizaci mezi počítačem, tabletem a mobilním telefonem. Další použití může být následující: [27]

- Bezdrátové připojení PC s tiskárnou, skenerem nebo vstupní perifériemi (klávesnice, myši, apod.).
- Díky profilu PAN umožňuje propojení několika zařízení do *ad-hoc* sítě, kde jeden počítač bude zařízením *master*, ostatní jeho *slave*.
- Tablet může být propojen s televizí, která podporuje Bluetooth, klávesnicí nebo senzory Bluetooth Smart.
- Tablety určené pro kreslení schémat nebo grafiky mohou být připojeny k PC a jednoduše tak synchronizovány.

Do domácí elektroniky můžeme řadit zařízení pro poslouchání hudby jako přenosné reproduktory, bezdrátová sluchátka. Dále se Bluetooth ve velké míře implementuje do dálkových ovladačů komunikujících s chytrou televizí, bezdrátové ovladače pro herní konzole, foto rámečky podporující technologii Bluetooth nebo digitální kamery pro okamžitý přenos natočeného materiálu do připojeného Bluetooth zařízení. [27]

4.3 Automobilový průmysl

Bluetooth si našlo cestu i do automobilového průmyslu. Díky technologii Bluetooth je u aut nejčastější službou propojení mobilního telefonu s hands-free setem nebo obyčejným headsetem. Vylučuje tak fyzickou manipulaci s mobilním telefonem, a tím zaručuje o něco vyšší bezpečnost na cestách.

Pokud samotný automobil podporuje Bluetooth, může se chytrý telefon připojit přímo na palubní počítač. Toto spojení nabízí široké spektrum možností použití, např: [27]

- Pomocí hlasových příkazů je možno procházet adresářem kontaktů.
- Zobrazení GPS navigace přes mobilní telefon na palubním počítači.
- Mobilní telefon připojený k mobilní síti může zjistit případné nehody nebo uzavírky.
- Aplikace pro chytrý telefon mohou řidiče varovat před zdravotními obtížemi, které se mohou během cesty objevit, např. alergenů nebo přes připojený senzor může sledovat hladinu cukru.

Případný majitel komunikačního zařízení by měl mít na paměti, že obě připojené zařízení musí pro žádanou službu obsahovat stejný Bluetooth profil. Například profil pro zasílání a přijímání zpráv mezi zařízeními MAP (*Message Access Profile*) není součástí starších telefonů, je tak nemožné používat tyto služby, pokud vlastníte starší mobilní telefon. [26]

4.4 Zdravotnictví

Na trhu se v této době nachází až 40 milionů zařízení pro lékařské účely, a to jak pro profesionální užití, tak na domácí. K rozšíření domácích zařízení s lékařským účelem napomohly zařízení Bluetooth Smart. Hlavní zaměření je pro sbírání dat o zdravotním stavu pacienta přes senzorové zařízení, např. měřič krevního tlaku. Tyto údaje se zpracují v příslušné aplikaci mobilního telefonu nebo tabletu a výsledky se pak posílají přímo doktorovi. Navíc díky vylepšené bezpečnosti při párování zařízení, které přinesla čtvrtá generace specifikace Bluetooth, je možno uchovat důvěrnost během přenosu.

Přístroje s Bluetooth se mohou využívat i přímo v ordinaci. Existují stetoskopy, které data o tlukotu vašeho srdce přenášejí bezdrátově přímo do počítače. Na podobném principu pracují i přístroje pro měření cukru a inzulinu v krvi. Tyto přístroje dokáží i, samozřejmě ve spolupráci s ošetřujícím lékařem, přesně určit potřebné dávky inzulinu. Do oblasti zdravotnictví lze přiřadit i váhy nebo senzory pro monitorování pulzu, srdečního tepu. [27]

Výrobce	Model	Typ zařízení
BiiFit	HRM01	Měřič srdečního tepu
iHealth Lab	GB5L	Měřič cukru v krvi
Prestigio	Smart Blood Pressure Monitor	Monitor krevního tlaku

Tabulka 4.1: Příklady zařízení používané ve zdravotnictví [28]

4.5 Chytrý domov

Technologie Bluetooth Smart umožňuje vybudovat uzavřený ekosystém založený na propojení všech zařízení k centrálnímu počítači. Každý přístroj, jako například chytré žárovky, zámky na dveře, termostaty komunikují přes Bluetooth s komunikačním zařízením, jehož aplikace může dům ovládat i automaticky.

Mezi přínosy podobného ekosystému je snižování nároků na energie v dané denní době. K tomu slouží různé měřiče, které zaznamenávají informace o spotřebě energie. Vlastník domu pak může nastavit výkon určitého zařízení, například klimatizace, a snížit tak energetickou spotřebu. Dalším příkladem můžou být zámky na dveře, které se při odchodu majitele uzamknou a naopak při příchodu navážou komunikaci se zařízením Bluetooth a automaticky otevře dveře. [27]

Výrobce	Model	Typ zařízení
Chamberlain	MyQ	Ovladač garážových dveří
FBSC	F-PLUG	Měřič spotřeby energie
Satechi	Spectrum iQ Bulb	Chytrá žárovka

Tabulka 4.2: Příklady zařízení používané pro ekosystém chytrého domova [28]

4.6 Další vývoj technologie Bluetooth

Bluetooth se nyní soustředí uje na rozšíření svých zařízení s čipy specifikace čtvrté generace, tudíž pro potřeby přístrojů fungujících na nízkou spotřebu. Dá se očekávat, že přístroje jako měřič srdečního tepu, různé váhy nebo chytré žárovky budou stále osazovány čipy Bluetooth. Díky nové specifikaci 4.2 bude nejspíše připravena nová generace zařízení, které se k sobě budou moci pojit pomocí ekosystému „Internetu věcí“.

Existují ale i oblasti, kde je výhodnější použití jiné technologie než Bluetooth. Například v těžkém průmyslu je pro bezdrátový přenos dat výhodnější použití standardu 802.15.4 neboli ZigBee. Tato technologie se používá v oblastech, kde není požadována vysoká rychlost, ale zároveň se požaduje nízká spotřeba.

Další takovou technologií může být NFC, které se používá jako elektronická peněženka. Výhodou NFC se stala možnost spárování dvou zařízení ve velmi krátkém čase. Dosah této technologie je však jen jednotky centimetrů a přenosové rychlosti jsou nižší než u Bluetooth. Můžeme tak říci, že Bluetooth spíše může doplňovat, než že by jej v budoucnu třeba nahradil.

Faktem je, že Bluetooth je podporován a vyvíjen největším množstvím společností a všechny pokusy o jeho nahrazení budou minimálně pár následujících let zbytečné.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat a porovnat technologii Bluetooth a jejich jednotlivé specifikace. Dalším bodem bylo zaměřit se na koncové mobilní komunikační zařízení, které tuto technologii využívají a v neposlední řadě popis různých oblastí, kde se může Bluetooth využívat. Čtenáři je tak podán ucelený obraz o bezdrátové technologii Bluetooth, způsobu jeho fungování, popisu specifikací tohoto standardu a také možnosti jeho použití.

V první části práce bylo cílem stručným způsobem popsat technologii Bluetooth, a to včetně jednotlivých vrstev řídicí a hostitelské části, parametrů a použitých protokolů a služeb. V první části nechybí stručná historie vývoje standardu. Předlohou pro popis technologie byly veřejnosti volně dostupné specifikace Bluetooth a standard IEEE 802.15.1 z roku 2005, který vychází za specifikace 1.2.

Ve druhé části práce jsem popsal a porovnal dosud vydané specifikace, podrobněji jsem popsal jejich parametry a největší změny oproti ostatním specifikacím. Také jsem popsal používané čipy v zařízeních podle jednotlivých specifikací Bluetooth. Při psaní této části jsem nejvíce využíval dostupných specifikací technologie Bluetooth ze serveru společnosti Bluetooth SIG, stejně jako v předchozí kapitole.

Kapitola 3 pak čtenáře seznámí s přehledem jednotlivých mobilních zařízení, především tedy mobilních telefonů. Tuto část jsem zpracoval postupně podle let a souvisejících specifikací k danému období. Ke každému období je připravena tabulka s nejznámějšími mobilními telefony té doby, samozřejmě osazené čipem Bluetooth. Ke každému typu jsou pak připsány příklady použitých profilů, nejčastěji jsou to základní profily jako pro připojení k hands-free setu v automobilech apod. Příprava této kapitoly byla v některých ohledech komplikovaná, ne všichni výrobci dají k dispozici kompletní informace k Bluetooth a všechny použité profily.

Poslední kapitola se zabývá technologickými oblastmi, kde se technologie uplatňuje. Každá oblast je krátce popsána, poté vždy následují příklady možného použití v každé oblasti. Podkapitoly zdravotnictví a prostředí „chytrého domova“ navíc obsahují i příklady různých zařízení, které jsou v současnosti vyráběny a používány. V této kapitole jsem se také krátce zaměřil na budoucnost, kterou se Bluetooth může odebírat, a také na možnou konkurenci pro tento bezdrátový standard.

Tomáš Jerga

Seznam literatury

- [1] Standard IEEE 802.15.1. *IEEE 802.15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs)*. Červen 2005. ISBN 0-7381-4708-7.
- [2] SVOBODA, J – SVOBODA, J. *Principy a perspektivy technologie Bluetooth. Sdělovací technika*. 2004, roč. 52, č. 8, s. 3-6. ISSN 0036-9942.
- [3] *Our History | Bluetooth Technology Website* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.bluetooth.com/Pages/History-of-Bluetooth.aspx>
- [4] PRAVDA, Ivan. *Bluetooth* [online]. 2013 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/.
- [5] *Bluetooth - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
- [6] ŠEBESTA, Roman a Marek DVORSKÝ. *Rádiové sítě I pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-3612-6
- [7] SVOBODA, J – SVOBODA, J. *Bluetooth – popis prvních dvou vrstev. Sdělovací technika*. 2005, roč. 53, č. 11/2005, s. 10-11. ISSN 0036-9942.
- [8] Bluetooth specifikace verze 1.1. *Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy*, Core, Volume 1, Únor 2001.
- [9] SVOBODA, J – SVOBODA, J. *Bluetooth – vrstvy a protokoly. Sdělovací technika*. 2005, roč. 53, č. 12/2005, s. 14-15. ISSN 0036-9942.
- [10] *Techbox: Bluetooth sjednotilo bezdrátovou komunikace | mobilenet.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://mobilenet.cz/clanky/techbox-bluetooth-sjednotilo-bezdratovou-komunikaci-12085>
- [11] *Základy technologie Bluetooth: původ a rozsah funkcí | PC World.cz* [online]. 2009 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://pcworld.cz/hardware/Zaklady-technologie-Bluetooth-puvod-a-rozsah-funkci-6635>
- [12] *Bluetooth Basics - learn.sparkfun.com* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/bluetooth-basics>
- [13] Bluetooth specifikace verze 2.0 + EDR. *Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy*, Core, Volume 1, 2, 3, Říjen 2004.
- [14] Bluetooth specifikace verze 2.1 + EDR. *Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy*, Core, Volume 1, 2, 3, Červenec 2007.

-
- [15] Bluetooth specifikace verze 3.0 + HS. *Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy*, Core, Volume 1, 2, 3, 4, 5, Duben 2009.
- [16] *Internet of Things - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_Things
- [17] Bluetooth specifikace verze 4.0. *Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy*, Core, Volume 1, 2, 3, 4, 5, 6, Červen 2010.
- [18] Bluetooth specifikace verze 4.1. *Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy*, Core, Volume 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, Prosinec 2013.
- [19] Bluetooth specifikace verze 4.2. *Specification of the Bluetooth System: Wireless Connection Made Easy*, Core, Volume 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, Prosinec 2014.
- [20] *Online Catalog | DigiKey Electronics* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/catalog/en/>
- [21] *GSMArena.com - GSM phone reviews, news, opinions, votes, manuals and more...* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.gsmarena.com/>
- [22] *Phones (Phone Scoop)* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.phonescoop.com/phones/>
- [23] *Bluetooth low energy - Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_low_energy
- [24] *iOS: Podporované profily Bluetooth - Apple podpora* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <https://support.apple.com/cs-cz/HT204387>
- [25] *Android Needs To Get Serious About Bluetooth Low Energy | Pocketnow* [online]. 2013 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://pocketnow.com/2013/01/17/bluetooth-low-energy>
- [26] *Profiles Overview | Bluetooth Development Portal* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <https://developer.bluetooth.org/TechnologyOverview/Pages/Profiles.aspx>
- [27] *Markets | Bluetooth Technology Website* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.bluetooth.com/Pages/market.aspx>
- [28] *Bluetooth Smart Devices List | Bluetooth Technology Website* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Smart-Devices-List.aspx#Smart>